



รายงานสหกิจศึกษาระดับสมบูรณ

การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงกลั่นน้ำมัน

โดยใช้เทอร์ไบน์

Feasibility Study of Electricity Production in Oil Refinery Using Turbine

ณัฐชา นัยนันท์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา	การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้เทอร์ไบน์
ชื่อ-สกุล นักศึกษา	นางสาวณัฐชา นัยนันท์
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ	รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ
ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน	1. นายพิรพจน์ เพทายพนากิจ (วิศวกรส่วนเทคนิค โรงกลั่น) 2. นางสาวพรทิพา คำรังบัณฑิตกุล (วิศวกรส่วนเทคนิค โรงกลั่น)
สถานประกอบการ	บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงกลั่นน้ำมันด้วยเทอร์ไบน์ใน 3 หน่วยปฏิบัติการ ได้แก่ หน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์ (Gas oil hydrodesulfurization unit) ที่มีอัตราการไหลของแก๊สออยล์ 143,680 kg/h หน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน (Hydrocracking unit) ที่มีอัตราการไหลของน้ำมันที่แตกตัว 182,400 kg/h และหน่วยดูดซึมแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเอมีน หรือหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน (Amine gas scrubber) ที่มีอัตราการไหลของสารละลายเอมีน 37,370 kg/h โดยใช้ความดันที่สูญเสียผ่านวาล์วลดความดันของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ ชนิดของเทอร์ไบน์ที่ศึกษา คือ บีเอ็มทีกลับทิศทางการไหล (Pump-as-Turbine: PaT) ความดันที่ลดจาก 45 barg เป็น 15 barg, 120 barg เป็น 30 barg และ 120 barg เป็น 6.5 barg ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าสำหรับหน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์และหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน เมื่อใช้เทอร์ไบน์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรงจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 700 MWh/yr และ 2,950 MWh/yr ตามลำดับ ในกรณีของหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน เมื่อใช้เทอร์ไบน์ขับเคลื่อนมอเตอร์ส่งกำลังให้กับบีเอ็มทีส่งสารละลายเอมีนเข้าหน่วยสครับเบอร์สามารถลดการใช้กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้ 670 MWh/yr อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) กรณีของหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนเท่ากับ 7.5% ภายในระยะเวลา 5 ปี ทั้งนี้ยังไม่ได้ประเมินต้นทุนของระบบท่อ ระบบควบคุม เครื่องมือวัด และค่าจ้างแรงงาน ผลการศึกษาไม่ได้ตามเกณฑ์อัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำของบริษัท คือ 15% ภายในระยะเวลา 5 ปี

คำสำคัญ: การผลิตกระแสไฟฟ้า เทอร์ไบน์ บีเอ็มทีกลับทิศทางการไหล

Cooperative Title: Feasibility Study of Electricity Production in Oil Refinery Using Turbine

Student intern name: Ms. Nutchai Naiyanan

Faculty: Engineering **Department:** Chemical Engineering

Advisor name: Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum

Mentor names: Mr. Peerapot Pataypanakit (Technical Engineer)
Ms. Porntipar Dumrongbunditkul (Technical Engineer)

Company: Bangchak Corporation Public Company Limited

Abstract

This project is a feasibility study of electricity production in oil refinery by using hydraulic power recovery turbine (HPRT). Three unit processes were targeted, i.e., gas oil hydrodesulfurization unit (GO-HDSU) with gas oil flow rate of 143,680 kg/h, hydrocracking unit (HCU) with cracked oil flow rate of 182,400 kg/h, and amine gas scrubber unit with flow rate of amine solution 37,370 kg/h. The energy recovered was attained from pressure loss from pressure reducing valves in those unit processes. Type of HPRT is a reverse running pump or pump running in turbine mode (Pump-as-Turbine: PaT). According to each unit process, the pressure reduced from 45 barg to 15 barg, 120 barg to 30 barg and 120 barg to 6.5 barg, respectively. It was found that by using the HPRT connected directly to the power generators, GO-HDSU and HCU generated electricity of 700 MWh/yr and 2,950 MWh/yr, respectively. In case of amine gas scrubber unit, the HPRT connected to a motor of lean amine pump. As a result, the electrical consumption of the motor reduced by 670 MWh/yr. The internal rate of return (IRR) of amine gas scrubber unit was 7.5% in 5 years excluding piping system, control system, instrumentation devices and labor costs. The calculated IRR did not meet the company's criteria of 15% minimum acceptable rate of return (MARR).

Keywords: Electricity production, Turbine, Pump-as-Turbine

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อัญชลีพร วรวิทวัสดี หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำโครงการ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ที่มอบโอกาสในการทำโครงการสหกิจศึกษา นายพีรพจน์ เพทายพนากิจ นางสาวพรทิพา ดำรงบัณฑิตกุลและพี่ๆ วิศวกร โรงกลั่นที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือ

กราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่สนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

ผู้ดำเนินงานหวังว่าโครงการนี้จะเป็นประโยชน์กับผู้สนใจ คุณงามความดีอันใดที่อาจเกิดจากโครงการนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูและคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้ดำเนินงานขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้

ณัฐชา นัยนันท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีดำเนินโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมัน	3
2.2 พลังงานน้ำ	6
2.3 วาล์วควบคุม	8
2.4 เทอร์ไบน์	10
2.5 ปัมป์ทำงานในโหมดเทอร์ไบน์	15
2.6 ความสูญเสียในระบบท่อ	23
2.7 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ	35
3.1 ศึกษากระบวนการกลั่นน้ำมัน	35
3.2 ศึกษาหลักการทำงานของระบบเทอร์ไบน์และเลือกประเภทของเทอร์ไบน์	36
3.3 คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้	37
3.4 พิจารณาอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบเทอร์ไบน์และตำแหน่งการติดตั้ง	38
3.5 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
3.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการ	39
4.1 ประเภทของเทอร์ไบน์	39
4.2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้.....	40
4.3 อุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบเทอร์ไบน์และตำแหน่งในการติดตั้ง	41
4.4 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
4.5 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น	45
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
บรรณานุกรม	50
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก เอกสารข้อมูลสมบัติของสาร	54
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้.....	59
ภาคผนวก ค งานที่ได้รับมอบหมายเพิ่มเติม.....	62
ประวัติผู้เขียน	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ข้อดีและข้อเสียของอิมพัลส์เทอร์ไบน์และรีแอกชันเทอร์ไบน์.....	39
4.2 ข้อดีและข้อเสียของรีแอกชันเทอร์ไบน์และปั๊มทำงานในโหมดเทอร์ไบน์.....	40
4.3 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละหน่วยปฏิบัติการ.....	41
4.4 เปรียบเทียบภาวะปฏิบัติการของหน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนและงานวิจัย.....	44
4.5 กระแสเงินสดของเทอร์ไบน์ในหน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน.....	46
ก.1 องค์ประกอบบริสุทธิ์ของแก๊สออยล์.....	54
ก.2 อุณหภูมิจุดตัด (Cut point) ของแก๊สออยล์.....	55
ก.3 สมบัติของสารในหน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์.....	57
ก.4 สมบัติของสารในหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน.....	58
ก.5 สมบัติของสารในหน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน.....	58
ค.1 สมบัติทางกายภาพของของไหล.....	63
ค.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละประเภท.....	67
ค.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	68
ค.4 ความเร็วของของไหลในท่อในแต่ละกรณี.....	70
ค.5 เทียบขนาดของเปลือก.....	70
ค.6 ค่าความต้านทานที่เกิดจากความสกปรกสำหรับ โรงกลั่นน้ำมัน.....	73
ค.7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สมมติกับค่าที่คำนวณได้.....	74
ค.8 สรุปผลการคำนวณของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนผังการกลั่นน้ำมันดิบ	3
2.2 ลักษณะของลิ้นวาล์วและกราฟคุณลักษณะการไหลของวาล์วควบคุม	9
2.3 โครงสร้างอย่างง่ายของเพลดันเทอร์ไบน์ (อิมพัลส์).....	10
2.4 ความดันลดของของไหลที่ไหลผ่านอิมพัลส์เทอร์ไบน์และรีแอกชันเทอร์ไบน์	11
2.5 ครีบบีพัดของเพลดันเทอร์ไบน์.....	12
2.5 โครงสร้างครอสโพลว์เทอร์ไบน์	13
2.7 ส่วนประกอบของฟรานซิสเทอร์ไบน์	14
2.8 แบบอย่างโครงสร้างของฟรานซิสเทอร์ไบน์ตามแนวรัศมี	14
2.9 ส่วนประกอบของแคปแลนเทอร์ไบน์	15
2.10 ทิศทางการไหลและลักษณะทั่วไปของปั๊มแรงเหวี่ยง	16
2.11 องค์ประกอบของ PaT	17
2.12 รายละเอียดของใบพัด	17
2.13 โครงสร้างของหอยโข่ง	18
2.14 ท่อรับน้ำของ PaT	18
2.15 คุณลักษณะของปั๊มที่ทำงานในโหมดเทอร์ไบน์ (T) และโหมดปั๊ม (P)	19
2.16 ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ชนิดต่างๆ และปั๊มในโหมดเทอร์ไบน์	20
2.17 การมนขอบของครีบบีพัดที่งานประกบที่ขอบทางเข้าใบพัด	21
2.18 เสด กำลัง และประสิทธิภาพของ PaT ที่ขนาดใบพัดต่างๆ	22
2.19 รูปแบบการไหลของของไหล (ก) ก่อนเพิ่ม Rib และ (ข) หลังจากเพิ่ม Rib.....	22
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อและค่าเรย์โนลด์	25
2.21 ผังกระแสเงินสด	26
2.22 แผนผังกระบวนการบำบัดแก๊สชีวภาพ	29
2.23 การจัดเรียงอุปกรณ์ต่างๆ ในกระบวนการบำบัดแก๊สชีวภาพ.....	30
2.24 แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก	31
2.25 กราฟเฮดไร้หน่วยของ PaT.....	31
2.26 กราฟกำลังไร้หน่วยของ PaT	32
2.27 กราฟประสิทธิภาพของ PaT.....	32
2.28 กระบวนการบำบัดด้วยแก๊สไฮโดรเจน	33
2.29 กระบวนการสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.30 ช่วงการใช้งานเทอร์ไบน์ในอุตสาหกรรมน้ำมัน.....	34
3.1 กระบวนการผลิตอย่างง่ายของกระบวนการกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์.....	35
3.2 กระบวนการผลิตอย่างง่ายของกระบวนการแตกโมเลกุลด้วยแก๊สไฮโดรเจน	36
4.1 การจัดเรียงเทอร์ไบน์ที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์ ..	42
4.2 การจัดเรียงเทอร์ไบน์เพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหน่วยแตกตัวด้วยไฮโดรเจน	42
4.3 การจัดเรียงเทอร์ไบน์เพื่อขับเคลื่อนปั๊มหอยโข่งของหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วย สารละลายเอมีน.....	43
4.4 ผังกระแสเงินสดของเทอร์ไบน์ในหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน	46
ก.1 การกำหนดองค์ประกอบของแก๊สออยล์ในฟังก์ชัน Petroleum assay	56
ก.2 แผนภาพการจำลองของโปรแกรม Aspen HYSYS Version10	56
ข.1 การติดตั้งเทอร์ไบน์ในหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน	59
ค.1 กระบวนการผลิตอย่างง่ายของหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนก่อนติดตั้ง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	62
ค.2 กระบวนการผลิตอย่างง่ายของหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนหลังติดตั้ง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 เครื่อง	63
ค.3 รูปแบบการไหลของ UCO และผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน (ก) กรณี 80% Conv. และ 90% Conv. (ข) กรณี 70% Conv.	64
ค.4 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	65
ค.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	66
ค.6 แฟกเตอร์การถ่ายเทความร้อนในเปลือก	72
ค.7 แฟกเตอร์การถ่ายเทความร้อนในท่อ.....	72
ค.8 แฟกเตอร์ความเสียหายในเปลือก	75
ค.9 แฟกเตอร์ความเสียหายในท่อ.....	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ประกอบธุรกิจโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ตั้งแต่จัดหาน้ำมันดิบทั้งจากแหล่งต่างประเทศและในประเทศมากขึ้นเป็นน้ำมันสำเร็จรูป และจัดจำหน่ายผ่านสถานีบริการน้ำมันบางจากทั่วประเทศ มีกำลังการผลิตสูงสุด 120,000 B/D ในปีพุทธศักราช 2560 (บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). 2562ก) บริษัทมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงถึง 130 GWh คิดเป็นมูลค่า 400 MTHB (บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). 2561) การลดการใช้ไฟฟ้าหรือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานที่สูญเสียในกระบวนการถือเป็นวิธีที่ช่วยลดต้นทุนในส่วนนี้ได้

ในกระบวนการกลั่นน้ำมัน หน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์ (Gas oil hydrodesulfurization unit) หน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน (Hydrocracking unit) และหน่วยดูดซึมแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเอมีนหรือหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน (Amine gas scrubber) ปฏิบัติการที่ความดัน 45 barg 120 barg และ 120 barg ตามลำดับ และจำเป็นต้องลดความดันให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ถัดไป ซึ่งการใช้วาล์วลดความดันเป็นวิธีที่ควบคุมได้ง่าย ลงทุนต่ำ และใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย อย่างไรก็ตามของไหลจะสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดัน ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการใช้เทอร์โบไบน์แทนวาล์วลดความดันจะช่วยให้สามารถนำพลังงานที่สูญเสียไปเปลี่ยนเป็นพลังงานกลเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น นำไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเครื่องจักรกลหมุน (Rotating machine) ชนิดอื่น นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โรงกลั่นน้ำมัน เริ่มมีการใช้เทอร์โบไบน์ติดตั้งแทนที่วาล์วลดความดัน เพื่อนำความดันที่สูญเสียมาใช้ประโยชน์ โดยมีความดันลดเท่าเดิม (Rossi, M. et al. 2016)

โครงการนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงกลั่นน้ำมันจากความดันที่สูญเสียจากวาล์วลดความดันด้วยเทอร์โบไบน์ ในหน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์ หน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน และหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน ชนิดของเทอร์โบไบน์ที่ทำการศึกษาคือ บีเอ็มแบบกลับทิศทางการไหล (Pump-as-Turbine: PaT) ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์ของบีเอ็ม เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้เทอร์ไบน์เพื่อนำพลังงานของของไหลที่สูญเสียจากวาล์วลดความดันมาใช้ประโยชน์

1.2.2 วิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายในเชิงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่หน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์ หน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน และหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน โดยใช้เทอร์ไบน์เพื่อนำพลังงานของของไหลที่สูญเสียจากวาล์วลดความดันมาใช้ประโยชน์

1.3.2 พิจารณาดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในหน่วยปฏิบัติการ

1.3.3 วิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายในเชิงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

1.4 วิธีดำเนินโครงการ

1.4.1 ศึกษากระบวนการกลั่นน้ำมัน

1.4.2 ศึกษาหลักการทำงานของระบบเทอร์ไบน์และเลือกประเภทของเทอร์ไบน์

1.4.3 คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้

1.4.4 พิจารณาอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบเทอร์ไบน์และตำแหน่งในการติดตั้ง

1.4.5 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.6 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 รายงานการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้เทอร์ไบน์

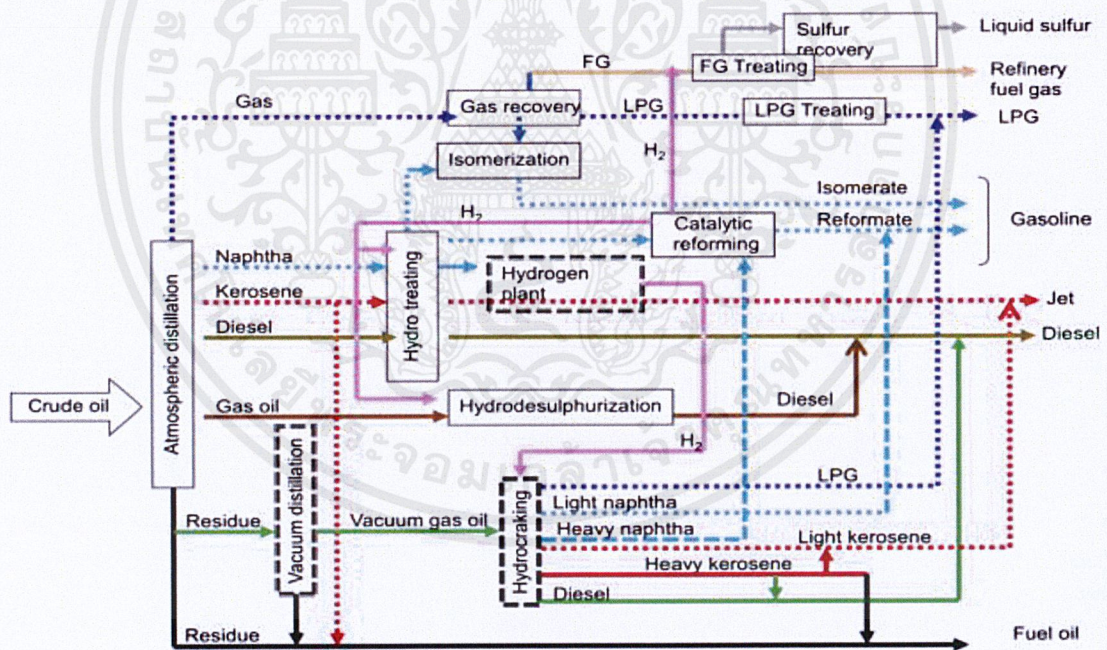
1.5.2 สามารถนำพลังงานของของไหลที่สูญเสียจากวาล์วลดความดันมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงกลั่นน้ำมันได้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมัน (บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). 2562ข)

การกลั่นน้ำมัน คือ การแยกน้ำมันดิบ (Crude oil) ที่มีช่วงจุดเดือดต่างๆ ออกเป็นผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการกลั่น (Distillate) นอกจากน้ำมันดิบที่ถูกแยกเป็นส่วนต่างๆ แล้ว สารเจือปน (Impurities) ที่อยู่ในน้ำมันดิบ ได้แก่ สารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจนก็ถูกกำจัดออกไปด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas, LPG) น้ำมันเบนซิน (Gasoline) น้ำมันเครื่องบิน เคโรซีน น้ำมันเตา เป็นต้น ส่วนที่เป็นกากก้นหอกกลั่น (Residue) สามารถนำไปเพิ่มมูลค่าด้วยหอกกลั่นสูญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กระบวนการกลั่นอาจแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สมบัติของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น ชนิดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เทคโนโลยีที่ใช้กระบวนการกลั่นโดยทั่วไปจะประกอบด้วยกระบวนการสำคัญ ดังนี้



รูปที่ 2.1 แผนผังการกลั่นน้ำมันดิบ (Kochaphum C. et al. 2012)

2.1.1 การกลั่นแยก (Fractional distillation)

การแยกส่วนประกอบของน้ำมันดิบทางกายภาพด้วยวิธีกลั่นลำดับส่วน ใช้หลักความแตกต่างของจุดเดือดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ในน้ำมันดิบ

2.1.1.1 หน่วยกลั่นบรรยากาศ (Atmospheric distillation unit)

หน่วยที่ทำหน้าที่กลั่นแยกน้ำมันดิบให้เป็นน้ำมันชนิดต่างๆ โดยนำน้ำมันดิบผ่านเตาเผาจนมีอุณหภูมิประมาณ 340-385 °C เพื่อให้ให้น้ำมันดิบมีอุณหภูมิเหมาะสมก่อนส่งเข้าสู่หอกลั่น เหนือถาดชั้นบนที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดได้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel gas) ชั้นถัดลงมามีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ ได้ส่วนกลั่นน้ำมันส่วนเบา (Lighter fraction) เช่น น้ำมันเบนซิน และแนฟทา (Naphtha) ส่วนกลั่นน้ำมันส่วนกลาง (Medium fraction) เช่น แก๊สออยล์ (Gas oil) เคโรซีน และน้ำมันดีเซล (Diesel) ตามลำดับ ส่วนผลผลิตก้นหอกลั่น หรือส่วนกลั่นน้ำมันหนัก (Heavy fraction) ได้แก่ น้ำมันเตา และกากก้นหอกลั่น แอสฟัลต์ (Asphalt) หรือไข (Wax) ส่วนกลั่นหนักและกากหอกลั่นสามารถนำไปเป็นสารป้อนเพื่อกลั่นที่หน่วยกลั่นสุญญากาศต่อไป

2.1.1.2 หน่วยแยกแก๊ส (Gas recovery unit, GRU)

หน่วยที่ทำหน้าที่รวบรวมแก๊สที่เกิดจากกระบวนการกลั่นต่างๆ รวมทั้งแนฟทาเบาจากหน่วยกลั่นบรรยากาศ และแยกออกเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการกลั่น แก๊สปิโตรเลียมเหลว และแนฟทาเบา ซึ่งจะถูส่งไปยังกระบวนการลำดับถัดไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้สูงขึ้น

2.1.1.3 หน่วยกลั่นสุญญากาศ (Vacuum distillation unit, VDU)

หน่วยที่นำน้ำมันหนักที่ได้จากใต้หน่วยกลั่นบรรยากาศ มาผ่านเตาเผาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนเข้าสู่หอกลั่นสุญญากาศเพื่อแยกน้ำมันหนักตามคุณสมบัติของจุดเดือด ผลิตภัณฑ์ที่ได้แยกออกเป็น แก๊สออยล์สุญญากาศชนิดเบา (Light vacuum gas oil, LVGO) ซึ่งจะส่งเข้าหน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์ (Gas oil hydrodesulfurization unit, GO-HDSU) แก๊สออยล์สุญญากาศชนิดหนัก (Vacuum gas oil) ส่งเข้าหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน (Hydrocracking unit, HCU) และกากน้ำมัน (Vacuum residue, VR) ซึ่งจะส่งไปเป็นน้ำมันเตา

2.1.2 การปรับปรุงคุณภาพ (Treating)

การปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยกำจัดสิ่งเจือปนที่มากับน้ำมันดิบและติดมาในผลิตภัณฑ์ เช่น กำมะถัน โลหะหนัก เป็นต้น เพื่อให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ขึ้นและมีสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน

2.1.2.1 หน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel gas treating unit, FGTU)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กำจัดกำมะถันในแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้สารละลายเอมีน สารละลายเอมีนที่มีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายอยู่ต่ำ (Lean amine) จะทำหน้าที่จับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยไหลสวนทางกับแก๊สเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันสูง (Sour fuel gas) ทำให้สารละลายเอมีนมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายอยู่มาก (Rich amine) แก๊สเชื้อเพลิงจึงมีปริมาณกำมะถันน้อยลง (Sweet fuel gas) ซึ่งจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงกลั่น ส่วน Rich amine จะถูก

ส่งไปแยกกำมะถันโดยใช้ความร้อนและนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนกำมะถันที่แยกได้จะส่งไปยังหน่วยผลิตกำมะถันต่อไป (Sulfur recovery unit, SRU)

2.1.2.2 หน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG treating unit)

หน่วยกำจัดกำมะถันจำพวกเมอร์แคปแทน (Mercaptan) ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนในแก๊สปิโตรเลียมเหลวให้กลายเป็นไดซัลไฟด์ (Disulfide) พร้อมทั้งแยกกำมะถันเหล่านี้ออกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารละลายเอมีน

2.1.2.3 หน่วยบำบัดด้วยแก๊สไฮโดรเจน (Hydrotreating unit)

กระบวนการที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ได้แก่ แนฟทา และเคโรซีนมีความเสถียรด้วยการกำจัดสารเจือปน เช่น สารประกอบไนโตรเจน กำมะถัน ออกซิเจนหรือโลหะหนักโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.2.4 หน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์ (Gas oil hydrodesulfurization unit, GO-HDSU)

ทำหน้าที่กำจัดกำมะถันในน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (High speed diesel) โดยใช้ไฮโดรเจนภายใต้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา แก๊สออยล์จากหน่วยกลั่นบรรยากาศจะถูกส่งผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 330 °C ก่อนส่งเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนเปลี่ยนสารประกอบกำมะถันให้เป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แก๊สนี้จะถูกแยกออกจากน้ำมันและส่งไปรวมกับแก๊สเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเจือปนเพื่อกำจัดกำมะถันต่อไป ส่วนแก๊สออยล์ที่มีกำมะถันต่ำจะถูกส่งไปยังถังเก็บ

2.1.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Conversion)

เป็นกระบวนการทางเคมีที่ทำให้โครงสร้างระดับโมเลกุลของน้ำมันเปลี่ยนแปลง โดยทำให้โมเลกุลของน้ำมันหนักแตกตัวเป็นน้ำมันเบาด้วยความร้อน ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือแก๊สไฮโดรเจน เพื่อแตกโมเลกุลหรือเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุล

2.1.3.1 หน่วยไอโซเมอไรเซชัน (Light naphtha isomerization unit)

หน่วยที่เปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของแนฟทาเบาที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบที่เป็นเส้นตรง (Normal form) ให้เป็นโครงสร้างโมเลกุลแบบกิ่ง (Iso form) ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าออกเทนสูงขึ้นเรียกว่าไอโซเมอร์เรท (Isomerase) โดยใช้ไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.3.2 หน่วยเปลี่ยนโครงสร้างด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming unit, CRU)

หน่วยที่ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของแนฟทาหนักให้เป็นโครงสร้างที่เป็นวงแหวน (Ring form) ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าออกเทนสูงขึ้นที่เรียกว่ารีฟอร์มเมท โดยใช้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.3.3 หน่วยแตกตัวด้วยไฮโดรเจน (Hydrocracking unit, HCU)

หน่วยที่ทำหน้าที่แตกตัวแก๊สออยล์สุญญากาศชนิดหนักเป็นองค์ประกอบเบาต่างๆ โดยใช้แก๊สไฮโดรเจน ผลผลิตที่ได้จาก HCU ได้แก่ แก๊สเชื้อเพลิง แก๊สปิโตรเลียมเหลว แนฟทาเบา แนฟทาหนัก น้ำมันเครื่องบิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา ซึ่งแนฟทาเบาจะถูกส่งไปยังหน่วยไอโซเมอไรเซชัน และแนฟทาหนักจะถูกส่งไปยังหน่วยเปลี่ยนโครงสร้างด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มค่าออกเทน

2.1.4 การผสม (Blending)

เป็นการนำผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันหรือนำมาเติมสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน เช่น การนำแนฟทาเบา รีฟอร์มเมท ไอโซเมอร์เรท Methyl tertiary-butyl ether (MTBE) และเอทานอลมาผสมกันได้น้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่ว หรือแก๊สโซฮอล์ เป็นต้น

2.2 พลังงานน้ำ (Hydraulic energy) (White, F.M. 2016)

โดยทั่วไปการศึกษาเครื่องจักรพลังงานน้ำโดยเฉพาะปั๊มหรือเทอร์ไบน์ นิยมแสดงรูปแบบของพลังงานในเทอมของ เฮด (ในหน่วยความยาว) ซึ่งแทนพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลของของไหลดังต่อไปนี้

2.2.1 เฮดความดัน (Pressure head, h)

ค่าความดันนอกจากจะบอกเป็นหน่วยแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เช่น N/m² psi หรือ kg/cm² แล้ว ถ้าเป็นความดันของของไหลก็มักนิยมบอกเป็นความสูงของของเหลวที่ก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนพื้นที่ผิวซึ่งรองรับแท่งของเหลว นั้น ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวนี้ เรียกว่า เฮดความดัน ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน p และเฮดความดัน h คือ

$$h = \frac{p}{\rho g} \quad (2.1)$$

2.2.2 เฮดความเร็ว (Velocity head, $V^2/2g$)

ของเหลวที่ไหลในท่อหรือทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใดๆ นั้นมีพลังงานจลน์อยู่ พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของเหลว เรียกว่า เฮดความเร็ว พลังงานจลน์ของวัตถุที่เคลื่อนที่ คือ

$$E_k = \frac{1}{2}mV^2$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{W}{g}\right)V^2 \quad (2.2)$$

โดยที่

- E_k = พลังงานจลน์, N-m
 m = มวล, kg
 V = ความเร็วของการไหล, m/s
 W = น้ำหนัก, N

2.2.3 เสดสถิต (Static head หรือ Elevation head, Z)

เมื่อของเหลวอยู่ในที่สูงจะมีพลังงานศักย์ในตัว (Potential head) พลังงานศักย์ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของเหลว เรียกว่า เสดสถิต พลังงานศักย์ของวัตถุที่ระดับ Z คือ

$$E_p = W \times Z \quad (2.2)$$

โดยที่

- E_p = พลังงานศักย์, N-m
 Z = ระดับ, m

2.2.4 เสดรวม (Total head, H)

เสดรวมของของเหลว ณ จุดหนึ่งจุดใด คือ พลังงานทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำ มีค่าเท่ากับ

เสดรวม = เสดความดัน + เสดความเร็ว + เสดสถิต

$$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + Z \quad (2.3)$$

2.2.5 เสดความฝืด (Friction head, h_f)

ในขณะที่ของเหลวไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง พลังงาน หรือเสดในการไหลส่วนหนึ่งจะสูญเสียไป เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของเหลวกับผนังท่อหรือทางไหลของน้ำ การเสียดสีกันเองของอนุภาคของเหลว พลังงานที่สูญเสียนี้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของเหลว เรียกว่า เสดความฝืด ฉะนั้นเสดความฝืดระหว่างตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 คือ

$$h_{L,1-2} = \left(\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \right) + \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) + (Z_1 - Z_2) \quad (2.4)$$

2.3 วาล์วควบคุม (Control valve) (ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ และศรีนคร นนทนาคร. 2559)

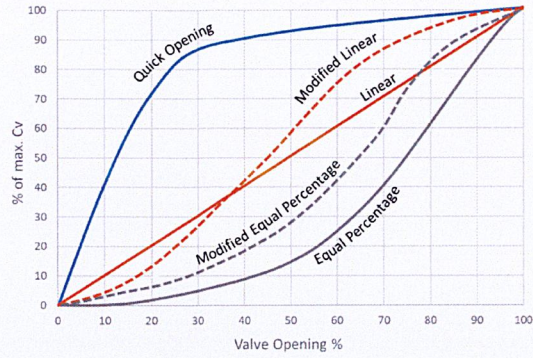
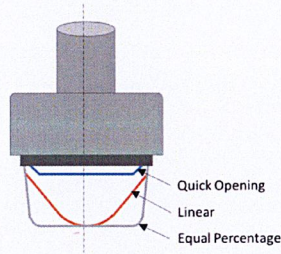
กระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมประกอบด้วยหลายกระบวนการย่อย ซึ่งจะถูกรวบรวมเพื่อควบคุมปัจจัยในกระบวนการผลิตที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ระดับของของเหลว ค่า pH และอื่นๆ ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย (Set point) แม้ภาวะปฏิบัติการและสภาพแวดล้อมจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทั้งนี้เพื่อควบคุมปัจจัยในกระบวนการผลิตต่างๆ ให้อยู่ในเงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อความปลอดภัยและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องเลือกระบบควบคุมที่เหมาะสม วาล์วควบคุมเป็นอุปกรณ์หนึ่งในระบบควบคุม มีหน้าที่ควบคุมการไหลของของไหล เช่น ไอ น้ำ น้ำมันดิบ น้ำมันสำเร็จรูป แก๊สธรรมชาติ เป็นต้น

วาล์วควบคุม เป็นอุปกรณ์ที่ถูกขับเคลื่อนด้วยกำลังจากภายนอกเพื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหล วาล์วควบคุมประกอบด้วย ตัววาล์วและอุปกรณ์เชื่อมต่อกันกับวาล์วกับกลไกการขับเคลื่อน (Actuator mechanism) ซึ่งสามารถเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นส่วนควบคุมการไหล (Flow controlling element) ภายในตัววาล์วหรือตำแหน่งของลิ้นวาล์วตามสัญญาณที่ได้รับจากระบบควบคุม (Controlling system)

2.3.1 คุณลักษณะการไหลของวาล์ว (Valve flow characteristic)

เป็นปัจจัยที่ใช้ในการเลือกชนิดของวาล์วที่เหมาะสมกับคุณลักษณะการไหล แสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านวาล์ว (Flow Rate Through the Valve) เทียบกับระยะเคลื่อนที่ของก้านวาล์ว (Valve Stem) โดยระยะเคลื่อนที่ก้านวาล์วเปลี่ยนจาก 0 % (ปิดสุด) - 100% (เปิดสุด) วัดค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขเมื่อความดันตกคร่อมวาล์ว (Pressure Drop) มีค่าคงที่โดยปกติจะมีค่าเท่ากับ 1 bar ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะการไหล คือ ชนิดของวาล์วและการออกแบบช่องทางการไหล (Port) ภายในตัววาล์ว โดยทั่วไปคุณลักษณะการไหลจะกล่าวถึงคุณลักษณะเฉพาะ 2 แบบ ได้แก่

2.3.1.1 Inherent flow characteristic หมายถึง คุณลักษณะการไหลที่ได้จากการที่ของไหลไหลผ่านวาล์วเมื่อมีความดันตกคร่อมวาล์วคงที่ (Constant pressure drop) เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบวาล์วภายใต้สภาวะแวดล้อมห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปข้อมูลดังกล่าวแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่าง Flow Coefficient (C_v) เทียบกับระยะเคลื่อนที่ของก้านวาล์ว ดังรูปที่ 2.2 คุณลักษณะการไหลที่พบบ่อยมี 3 แบบ คือ แบบ Liner แบบ Equal percentage และแบบ Quick opening



รูปที่ 2.2 ลักษณะของลิ้นวาล์วและกราฟคุณลักษณะการไหลของวาล์วควบคุม (Praveen, K. 2017)

2.3.1.2 Installed flow characteristic หมายถึง คุณลักษณะการไหลเมื่อความดันตกคร่อมวาล์วเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อวาล์วติดตั้งอยู่ในกระบวนการใช้งานจริง

2.3.2 ความดันตกที่เกิดจากวาล์วและข้อต่อ

การสูญเสียความดันหรือความดันตก คือ การลดลงของความดันระหว่างจุด 2 จุด ในระบบการไหลของของไหล ความดันตกเกิดขึ้นในแนวทิศทางการไหลในท่อ เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างของเหลวกับของเหลว ระหว่างของเหลวกับผนังท่อ การวางท่อหรือการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหล ความดันตกสัมพันธ์กับความเร็ว ความถ่วงจำเพาะ ความหนืดของของไหล ขนาดรูปร่างและความขรุขระภายในของท่อ สามารถคำนวณความดันตกคร่อมวาล์วได้จากสมการที่ 2.5

$$C_v = \frac{1.17Q\sqrt{G}}{\sqrt{\Delta P}} \quad (2.5)$$

โดยที่

C_v = ค่าคงที่การไหล (Flow coefficient)

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร, m^3/h

G = ความถ่วงจำเพาะของของไหล

ΔP = ความดันตกคร่อมวาล์ว, kg/cm^2

เมื่อของไหลไหลอย่างต่อเนื่องในท่อตรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ จะถือว่าเป็นรูปแบบการไหลที่แน่นอน สิ่งกีดขวางใดๆ ในท่อ ที่เปลี่ยนทิศทางการไหลบางส่วนหรือทั้งหมดของของไหล จะเปลี่ยนรูปแบบการไหลและทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ส่งผลให้สูญเสีย

พลังงานมากกว่าการไหลแบบปกติในท่อ การติดตั้งวาล์วหรือข้อต่อในท่อจะรบกวนรูปแบบการไหลของของไหลทำให้เกิดความดันลดมากขึ้น

2.4 เทอร์ไบน์ (Hydraulic power recovery turbine, HPRT)

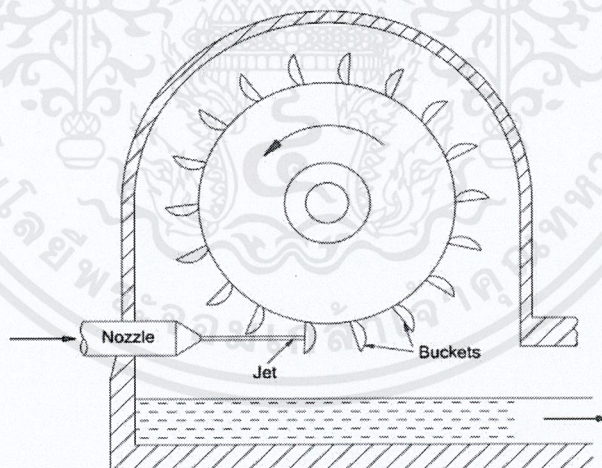
เทอร์ไบน์เป็นเครื่องจักรที่ใช้เปลี่ยนพลังงานจากการไหลของของไหลเป็นพลังงานกล ด้วยการลดความดันของของไหล พลังงานกลในการหมุน (Rotational mechanical energy) สามารถนำไปใช้ขับเคลื่อนเครื่องจักรกลหมุน (Rotating machine) ชนิดอื่นหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Giardinella, S. et al. 2017)

2.4.1 ชนิดของเทอร์ไบน์ (Carravetta, A. et al. 2018)

เทอร์ไบน์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามวิธีการแปลงพลังงานของของไหลให้เป็นพลังงานกล ดังนี้

2.4.1.1 อิมพัลส์เทอร์ไบน์ (Impulse turbine)

โดยทั่วไปแล้วอิมพัลส์เทอร์ไบน์ประกอบไปด้วย หัวฉีดอยู่กับที่และแผ่นจานหมุน (Rotor) ที่มีใบพัดลักษณะคล้ายถังน้ำ เมื่อของไหลไหลผ่านหัวฉีดอยู่กับที่ซึ่งพุ่งตรงไปยังใบพัดด้วยความเร็วสูง ทำให้ใบพัดเริ่มหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างอย่างง่ายของเพลดันเทอร์ไบน์ (อิมพัลส์) (Essom Co., Ltd. 2019)

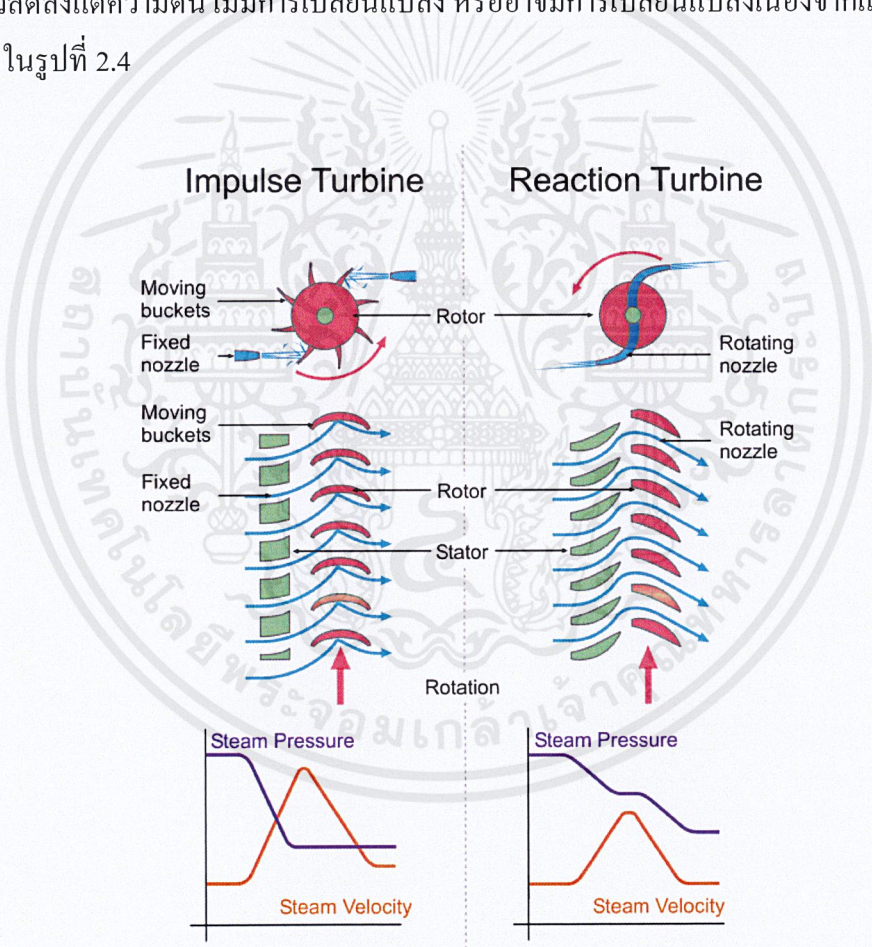
เทอร์ไบน์ประเภทนี้เสดความดันทั้งหมดจะถูกหัวฉีดเปลี่ยนเป็นเสดความเร็วที่ความดันบรรยากาศ เมื่อของไหลไหลผ่านหัวฉีด ทำให้ของไหลมีความดันลดลง เอนทาลปีลดลง และมีความเร็วเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานศักย์ของของไหลเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์

ใบพัดเทอร์ไบน์มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ของของไหลเป็นพลังงานกล หากพลังงานจลน์ทั้งหมดถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานกล ความเร็วด้านขาออกของของไหลจะเป็น 0 m/s ซึ่ง

เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ แต่เป็นการแสดงให้เห็นว่าใบพัดเทอร์ไบน์จะทำให้ของไหลมีความเร็วด้านข้างออกใกล้เคียงกับ 0 m/s

หลักการการทำงานของอิมพัลส์เทอร์ไบน์

ของไหลที่มีความดันสูงไหลผ่านหัวฉีดอยู่กับที่ของเทอร์ไบน์ ส่งผลให้ความดันของของไหลลดลงและมีความเร็วเพิ่มขึ้น ของไหลความเร็วสูงจะกระทบกับใบพัดเทอร์ไบน์ที่มีรูปร่างเหมาะสม ทำให้ทิศทางการไหลของของไหลเปลี่ยนไป ผลของการเปลี่ยนทิศทางการไหลจะสร้างแรงกระทำ แรงนี้ทำให้ใบพัดเคลื่อนซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน “ความเร่งของวัตถุจะแปรผันตรงและมีทิศเดียวกับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุ และแปรผกผันกับมวลของวัตถุ” เมื่อมีแรงลัพธ์ ขนาดไม่เป็นศูนย์มากระทำกับวัตถุ” เมื่อของไหลกระทบกับใบพัดเทอร์ไบน์จะมีความเร็วลดลงแต่ความดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรืออาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



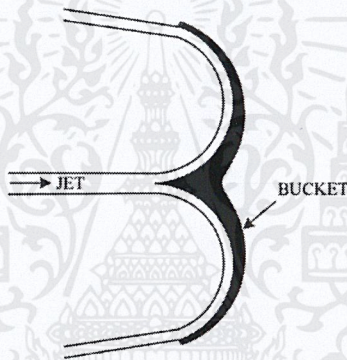
รูปที่ 2.4 ความดันลดของของไหลที่ไหลผ่านอิมพัลส์เทอร์ไบน์และรีแอกชันเทอร์ไบน์

(Mechanical engineering site. 2018)

อิมพัลส์เทอร์ไบน์ที่เป็นที่นิยม คือ เพลตันเทอร์ไบน์และครอสโฟลว์เทอร์ไบน์

1) เพลตันเทอร์ไบน์ (Pelton turbine) (พฤทธิ สกลช่างสัจจะทัย. 2557)

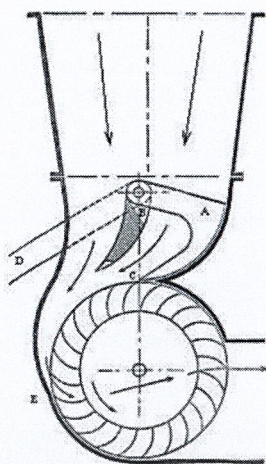
เพลตันเทอร์ไบน์นี้เหมาะสำหรับใช้งานกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดกลางที่ของเหลวมีเฮดค่อนข้างสูง (1,800 m.) และมีอัตราการไหลค่อนข้างต่ำ เพลตันเทอร์ไบน์มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 วงล้อมีครีบบู๊ตที่เรียกว่า Bucket ครีบบู๊ตประกอบด้วยผิวโค้งที่คล้ายคลึงกับช้อน 2 อันที่วางชิดกันดังรูปที่ 2.5 น้ำความเร็วสูงพุ่งเข้าชนกับครีบบู๊ตและแยกออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน น้ำแต่ละส่วนถูกครีบบู๊ตเปลี่ยนทิศทางการไหลโดยทำมุม 165 องศา กับทิศทางการไหลเดิม ตามทฤษฎี หากสามารถเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำได้ 180 องศา กับทิศทางการไหลเดิมจะทำให้เทอร์ไบน์มีกำลังสูงสุด แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้เพราะน้ำที่ไหลกลับจะเกิดขบวนการเคลื่อนที่ของครีบบู๊ตที่ตามหลังมา จึงต้องเบนออกไปทางด้านข้าง พลังงานน้ำเกือบทั้งหมดใช้ผลักดันใบพัดเทอร์ไบน์ ส่วนน้ำที่เปลี่ยนทิศทางการไหลจะตกลงสู่ช่องระบายน้ำด้านล่าง



รูปที่ 2.5 ครีบบู๊ตของเพลตันเทอร์ไบน์ (Essom Co., Ltd. 2019)

2) ครอสฟลว์เทอร์ไบน์ (Cross flow turbine) (พฤทธิ สกลช่างสัจจะทัย. 2557)

ครอสฟลว์เทอร์ไบน์ ใช้ในระบบที่มีเฮดต่ำ 10-70 m (Brekke, H. 2001) และมีอัตราการไหลสูง ประกอบด้วยใบจักรหรือวงล้อ (Runner) และหัวฉีด (Nozzle) ดังรูปที่ 2.6 ของไหลที่มีความดันสูงจะถูกปล่อยให้ไหลผ่านหัวฉีดซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ใบจักรหรือวงล้อทำด้วยจานกลม 2 จานที่ยึดขอบจานเข้าติดกันด้วยชุดของครีบบู๊ตที่มีผิวเป็นส่วนโค้งของวงกลม หัวฉีดจะฉีดของไหลที่ครีบบู๊ตและไหลลงผ่านแกนเพลาลงมาปะทะกับครีบบู๊ตที่บริเวณวงล้อด้านล่างอีกครั้ง ก่อนที่จะไหลออกจากเทอร์ไบน์ด้วยแรงโน้มถ่วง ประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงกำลังและมีราคาถูก ดังนั้นครอสฟลว์เทอร์ไบน์จึงเป็นแบบที่ของไหลไหลตามแนวรัศมี



รูปที่ 2.6 โครงสร้างครอสโพลว์เทอร์ไบน์ (Essom Co., Ltd. 2019)

2.4.1.2 รีแอกชันเทอร์ไบน์ (Reaction turbine)

ความดันของของไหลจะลดลงเมื่อไหลผ่านใบพัดของเทอร์ไบน์ ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันเมื่อไหลผ่านใบพัดทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาส่งผลให้ใบพัดเคลื่อนที่ (Brekke, H. 2001)

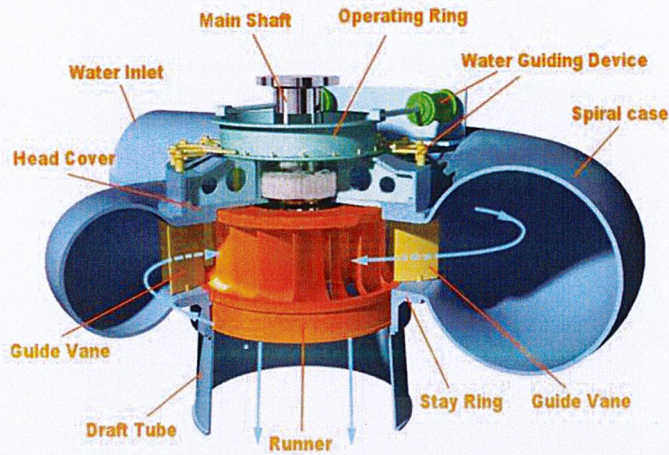
หลักการทำงานของรีแอกชันเทอร์ไบน์

รีแอกชันเทอร์ไบน์ มีแกนของใบพัดตรงสลับกับแกนของใบพัดเคลื่อนที่ ความดันของของไหลลดลงเมื่อไหลผ่านใบพัดตรง ส่งผลให้ของไหลมีความเร็วเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจะไหลเข้าสู่ใบพัดเคลื่อนที่ ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลเกิดแรงกระทำบนใบพัดเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามเมื่อของไหลไหลผ่านใบพัดเคลื่อนที่ ความดันของของไหลจะลดลงส่งผลให้เกิดแรงปฏิกิริยาต่อใบพัด

ความดันของของไหลจะลดลงเมื่อไหลผ่านใบพัดตรงและใบพัดเคลื่อนที่ในขณะที่มีความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อไหลผ่านใบพัดตรงและลดลงเมื่อไหลผ่านใบพัดเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.4 รีแอกชันเทอร์ไบน์ ที่เป็นที่นิยม คือฟรานซิสเทอร์ไบน์และแคปแลนเทอร์ไบน์

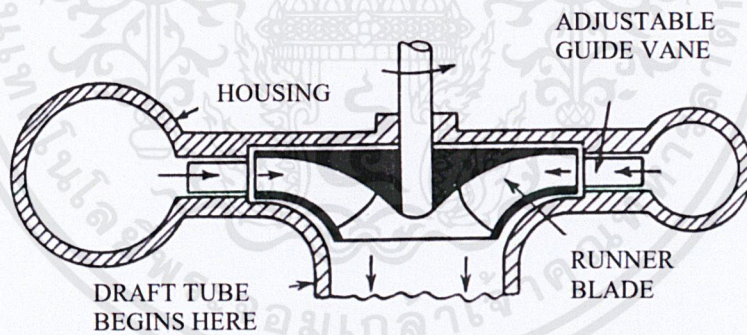
1) ฟรานซิสเทอร์ไบน์ (Francis turbine) (พฤทธิ สุกุลช่างสังจะทัย. 2557)

ฟรานซิสเทอร์ไบน์แสดงดังรูปที่ 2.7 ใช้ในระบบที่มีเสด 50-650 m และอัตราการไหล 10-700 m³/s (Brekke, H. 2001) ขณะที่เทอร์ไบน์ทำงานของไหลจะไหลออกจากคิริบั้งคัับทิศทางการไหลที่เรียกว่า Guide vane หรือ Wicket gates ที่หันเข้าหาจุดศูนย์กลางของตัวใบจักร ของไหลที่ไหลเข้าใบจักร (Runner) ซึ่งอยู่ระหว่างคิริบั้งคัับทิศทางการไหล (Guide vane) กับตัวใบจักรนั้นจะมีความดันสูงมาก คิริบั้งของใบจักรที่ปรับมุมเอียงของคิริบั้งใบจักรไม่ได้มีความคล้ายคลึงกับใบพัดแบบผสมการไหลของเครื่องสูบน้ำ



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของฟรานซิสเทอร์ไบน์ (Fasi, U. R. 2016)

เทอร์ไบน์ชนิดนี้ไม่มีหัวฉีดของไหล แต่มีครีบบังคับทิศทางการไหลติดอยู่กับตัวเรือน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ของไหลที่มีความดันสูงจะไหลเข้าตัวเรือนเทอร์ไบน์รูปเปลือกหอยรอบๆ ใบจักร หลังจากทีไหลผ่านครีบบังคับทิศทางการไหลที่สามารถปรับมุมเอียงแล้ว ของเหลวจะไหลเข้าไปในใบจักรตามแนวระนาบในลักษณะที่ตัดฉากกับแกนหมุน ของเหลวส่วนใหญ่จะไหลตามแนวรัศมีเข้าหาจุดศูนย์กลางของใบจักร ดังนั้นอาจเรียกเทอร์ไบน์แบบนี้ว่าเทอร์ไบน์ตามแนวรัศมี



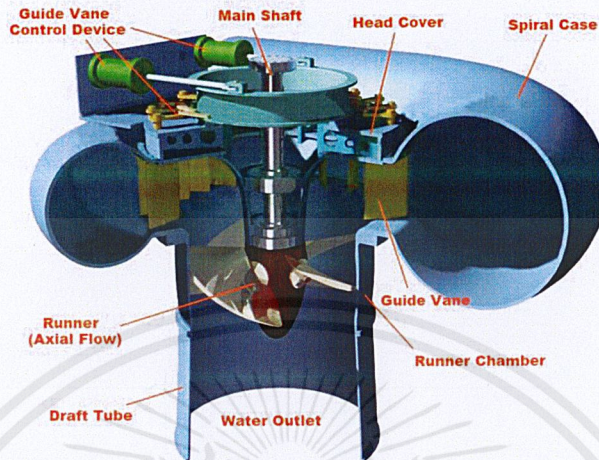
รูปที่ 2.8 แบบอย่าง โครงสร้างของฟรานซิสเทอร์ไบน์ตามแนวรัศมี (Essom Co., Ltd. 2019)

ใบจักรของฟรานซิสเทอร์ไบน์สามารถตรงเข้ากับเพลลาของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้

2) แคลปแลนเทอร์ไบน์ (Kaplan turbine) (พฤทธิ สกลช่างสัจจะทัย. 2557)

แคลปแลนเทอร์ไบน์ แสดงดังรูปที่ 2.9 ใช้ในระบบที่มีเสดต่ำกว่า 50 m และอัตราการไหล 4-55 m³/s (H. Brekke, 2001) ของเหลวไหลผ่านครีบบังคับทิศทางการไหลเหมือนกับฟรานซิสเทอร์ไบน์และไหลไปตามแนวแกนของเทอร์ไบน์ก่อนที่จะไหลเข้าไปในใบจักร ใบจักรของเทอร์ไบน์ชนิดนี้มีลักษณะคล้ายใบพัดเรือ ใบจักรสามารถปรับมุมเอียงของครีบบังคับได้เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพการทำงาน ครีบบังคับทิศทางการไหลจะพาของเหลวไหลตามแนวรัศมีไปยังแกนก่อนจะหมุนในแนวแกนมุ่งไปยังใบจักร การไหลเป็นแบบ 2 มิติในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนหมุน

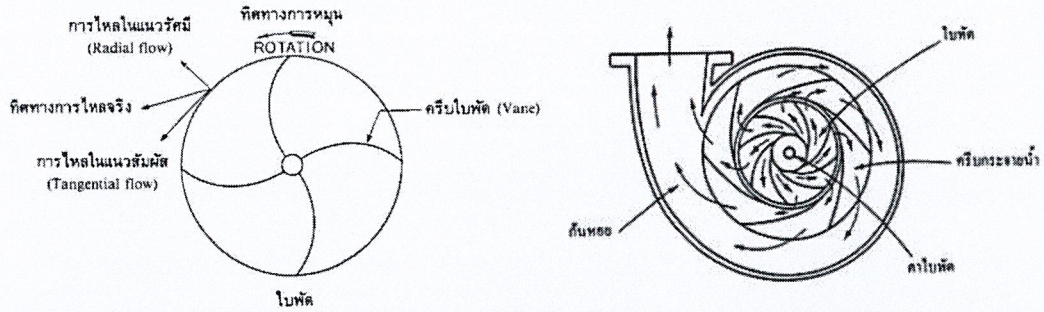


รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของแคปแลนเทอร์ไบน์ (Dongfang power Co., Ltd. 2019)

รีแอกชันเทอร์ไบน์มีลักษณะการทำงานคล้ายกับปั๊มที่ทำงานแบบย้อนกลับ (ของไหลเข้าทางด้านหัวทิศความดันสูงและออกทางด้านหัวทิศความดันต่ำ) ส่วนการออกแบบเชิงกลจะใช้ใบพัดเทอร์ไบน์ (Runner) แทนใบพัดของปั๊ม (Impeller)

2.5 ปั๊มทำงานในโหมดเทอร์ไบน์ (Pump-as-Turbine, PaT) (สุเทพ แก้วนิย. 2554)

ปั๊มหอยโข่งเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง นิยมใช้ในการสูบน้ำ สารหล่อลื่น สารละลายเคมี เป็นต้น มีประสิทธิภาพในการสูบลึง 90% สามารถออกแบบเพื่อการทำงานที่ระบบความดันสูงได้ ชิ้นส่วนที่หมุนอยู่ภายในเรือนปั๊มจะทำให้เกิดการขับเคลื่อนของไหล เรียกว่า ใบพัด (Impeller) ตัวแพร่กระจายน้ำ (Diffuser) เป็นส่วนที่อยู่ถัดที่ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนเสดความเร็ว ให้อยู่ในรูปความดันสถิต ของไหลที่ถูกสูบจะไหลเข้าสู่ช่องทางเข้าซึ่งขนานกับพื้นระนาบและถูกผลักออกไปตามแนวรัศมีของใบพัด กลไกการส่งผ่านพลังงานจะเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของของไหล ก่อให้เกิดความแตกต่างของความดันภายในระบบ ขับดันของไหลให้ไหลในแนวเส้นรอบวงทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เกิดการไหลจากจุดศูนย์กลางของใบพัดออกไปสู่แนวเส้นรอบวงทุกทิศทางและออกไปทางท่อส่ง ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ทิศทางการไหลและลักษณะทั่วไปของปั๊มแรงเหวี่ยง (Gulich, J.F. 2010)

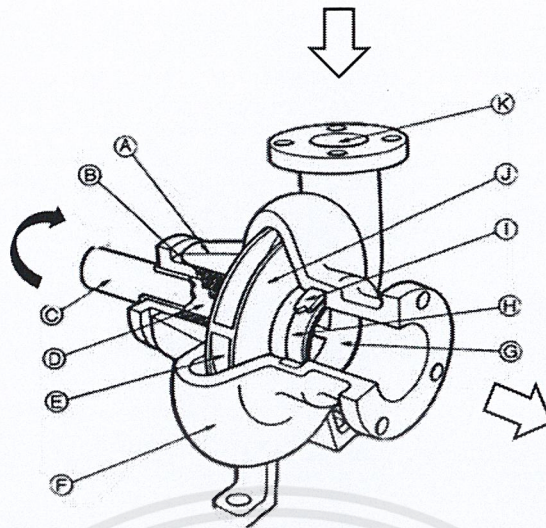
ปั๊มแรงเหวี่ยงที่หมุนกลับทางสามารถใช้เป็นเทอร์โบไบน์ได้ เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืนมา (Power recuperation) ในมาตรฐาน API 610 จะเรียกว่า Hydraulic power recovery turbine (HPRT)

ปั๊มแรงเหวี่ยงถ่ายเทพลังงานให้แก่ของไหล ทิศทางการหมุนและการไหลสำหรับการทำงานของปั๊มดังกล่าวเป็นบวก แต่ปั๊มแรงเหวี่ยงสามารถเปลี่ยนพลังงานของเหลวเป็นพลังงานกล ทิศทางการหมุนและการไหลย้อนกลับถือว่าเป็นลบ ในการทำงานเป็นเทอร์โบไบน์ ความดันที่ทางเข้าของหัวฉีดจะสูงกว่าทางออกของหัวฉีด (Diffuser) หรือหอยโข่ง (Volute) จะป้อนของเหลวเข้าสู่ขอบนอกของใบพัด หัวฉีดที่ทางออกของปั๊มจะเป็นหัวฉีดที่ทางเข้าของเทอร์โบไบน์ ขณะที่หัวฉีดที่ทางออกของปั๊มจะกลายเป็นหัวฉีดที่ทางออกของเทอร์โบไบน์

ปั๊มทำงานในโหมดเทอร์โบไบน์ ของไหลความดันสูงจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์แล้วไหลออกหลังจากที่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใบพัด (พลังงานของไหลเป็นพลังงานกล) เนื่องจากทิศทางการไหลและความเร็วในการหมุนกลับด้าน สามเหลี่ยมความเร็ว (Velocity triangle) ของทั้งสองโหมดจึงเปลี่ยนไป

2.5.1 องค์ประกอบของปั๊มแรงเหวี่ยงในโหมดเทอร์โบไบน์ (Carravetta, A. et al. 2018)

องค์ประกอบของเครื่องแต่ละเครื่องนั้นแตกต่างกันออกไปตามประเภทของ PaT แต่โดยทั่วไปส่วนประกอบของ PaT แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เคลื่อนที่ (หมุน) ประกอบไปด้วย ใบพัดและเพลลา และกลุ่มที่ไม่เคลื่อนที่ ประกอบไปด้วยส่วนขาเข้า (ท่อทางด้านขาเข้าและท่อรูปหอยโข่ง) ส่วนขาออก (ท่อทางด้านขาออก ท่อรับน้ำ (Draft tube)) ตัวเรือนปั๊มและอุปกรณ์เชิงกล (แหวน ซีลกันรั่ว แบร์ริง) อย่างไรก็ตามส่วนประกอบที่สำคัญประกอบไปด้วย ใบพัด หอยโข่ง และท่อรับน้ำ แสดงในรูปที่ 2.11

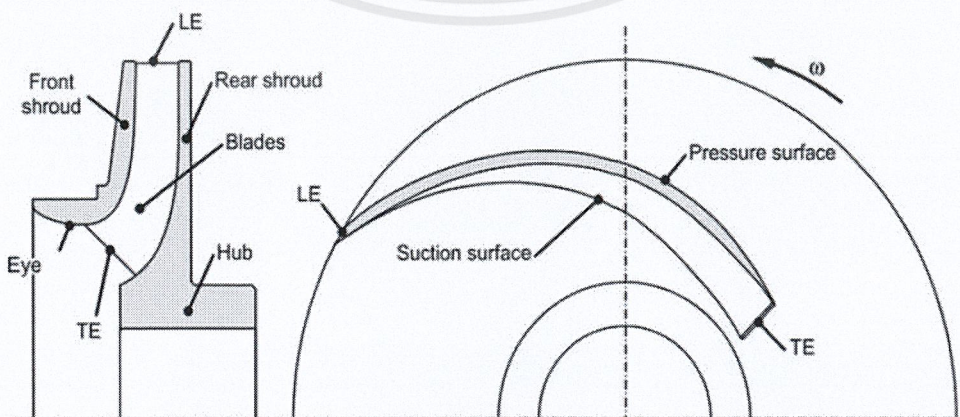


A	B	C	D	E	
Seal	Cover	Shaft	Shaft Sleeve	Channel	
F	G	H	J	I	K
Volute	Outlet	Impeller Eye	Impeller	Wear ring	Inlet

รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของ PaT (Gulich, J.F. 2010)

2.5.1.1 ใบพัด (Runner)

ใบพัด เป็นองค์ประกอบหลักของ PaT ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของเหลวเป็นพลังงานกล (งานของเพลลา) ถึงแม้ว่าใบพัดจะถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มความดันให้กับของเหลวโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง แต่ยังสามารถใช้ดูดซับพลังงานการไหลได้ ใบพัดมักจะมี 5-8 ใบ ที่มีรูปทรงไฮโดรฟอยล์ รายละเอียดของใบพัดแสดงดังรูปที่ 2.12

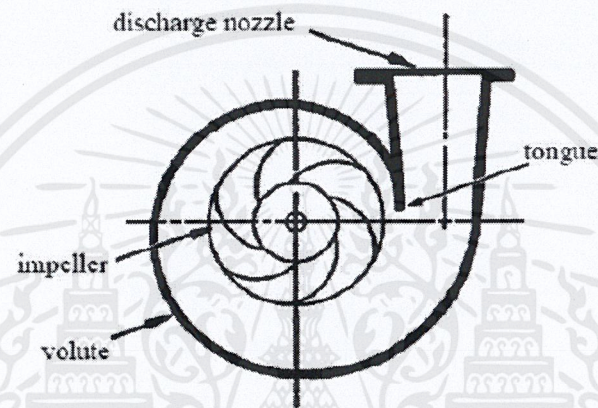


รูปที่ 2.12 รายละเอียดของใบพัด (Gulich, J.F. 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 หอยโข่ง

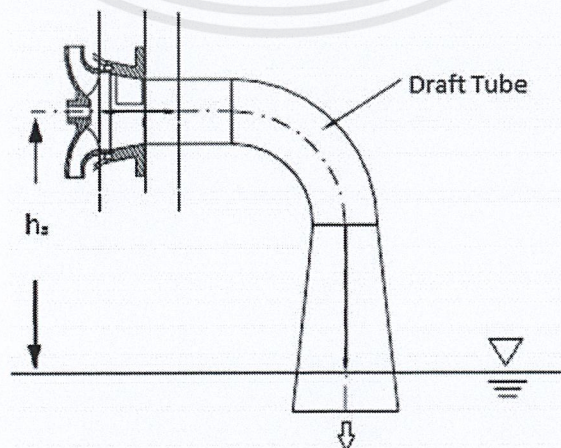
ก่อนที่ของไหลจะไหลเข้าใบพัด ของเหลวจะไหลผ่านส่วนที่รองรับของเหลว ซึ่งมี 2 แบบคือ แบบหอยโข่งและแบบมีครีบน้ำ หลักการออกแบบหอยโข่งของปั๊มคล้ายคลึงกับการออกแบบของฟรานซิสเทอร์ไบน์ (เช่น หลักการความเร็วคงที่) ดังนั้นเมื่อกลับทิศทางการไหล หอยโข่งของ PaT จะทำงานเป็นตัวกระจายของไหลรอบใบพัด ของไหลจะมีความเร็วสูงขึ้นและมีความดันลดลง ของเหลวถูกนำเข้าหอยโข่งด้วยลิ้น (Tongue) ลิ้นเป็นขอบที่ติดอยู่ที่ปลายกันหอย ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของหอยโข่ง (Gulich, J.F. 2010)

2.5.1.3 ท่อรับน้ำ

PaT จำเป็นต้องมีพลังงานจลน์ที่ด้านขาออกเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน การใช้ท่อรับน้ำสามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานศักย์ได้ ดังนั้นท่อรับจะถูกออกแบบตามการเปลี่ยนความเร็วเป็นความดันสูงสุด ตามสมการเบอร์นูลลี ลักษณะของท่อรับน้ำแสดงดังรูปที่ 2.14

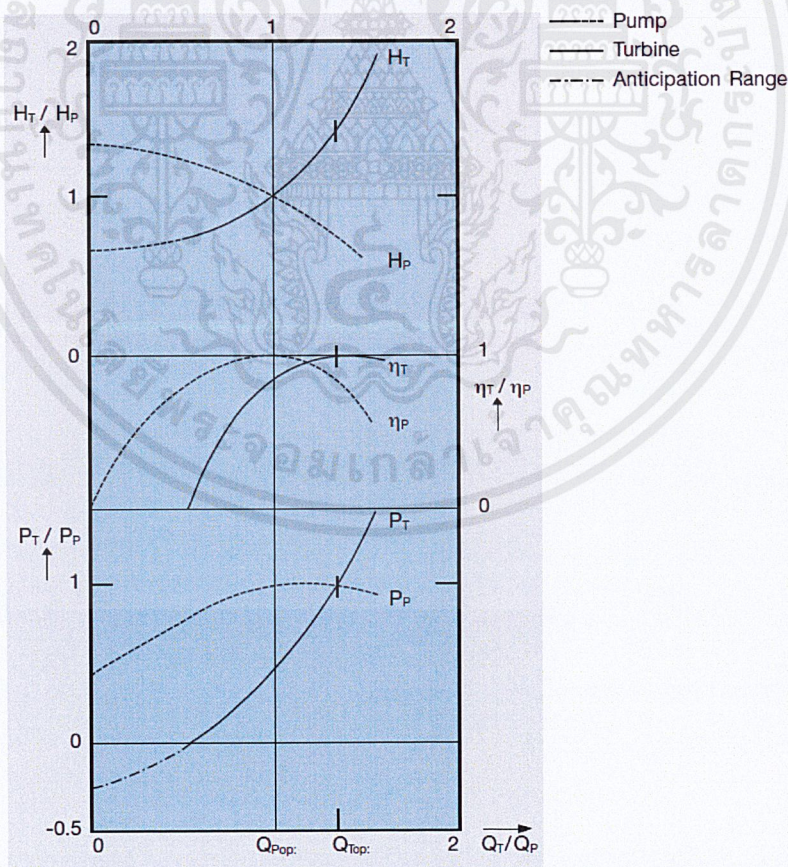


รูปที่ 2.14 ท่อรับน้ำของ PaT (Singh, P. 2005)

2.5.2 ประสิทธิภาพของปั๊มในโหมดเทอร์ไบน์ (Adam, R. and Parker, J. 2011)

เมื่อปั๊มทำงานในโหมดเทอร์ไบน์ ประสิทธิภาพของปั๊มในโหมดเทอร์ไบน์จึงมีความแตกต่างจากการทำงานในโหมดปั๊ม ในกรณีที่มีความเร็วในการหมุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเท่ากัน มีความแตกต่างกันดังนี้

- ประสิทธิภาพของปั๊มในโหมดเทอร์ไบน์ที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด (Best efficiency point , BEP) จะมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าการทำงานในโหมดปั๊ม ขึ้นอยู่กับขนาดเครื่อง
- จุดประสิทธิภาพสูงสุดของปั๊มในโหมดเทอร์ไบน์จะอยู่ในตำแหน่งที่มีอัตราการไหลและเฮดสูงกว่าในโหมดปั๊ม
- กำลังของเพลลาที่จุดปฏิบัติการที่ดีที่สุด (Best operating point) ของการทำงานในโหมดเทอร์ไบน์จะสูงกว่าในโหมดปั๊ม
- อัตราการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) ในการทำงานโหมดเทอร์ไบน์ต่ำกว่าในโหมดปั๊ม เนื่องจากของไหลที่มีความดันต่ำอยู่ที่ทางออกของใบพัดเทอร์ไบน์



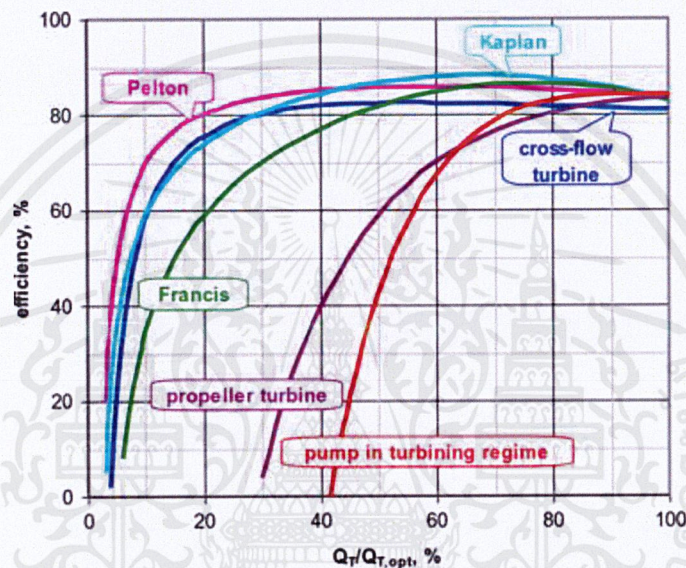
รูปที่ 2.15 คุณลักษณะของปั๊มที่ทำงานในโหมดเทอร์ไบน์ (T) และโหมดปั๊ม (P)

(Adam, R. and Parker, J. 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 การพัฒนาการออกแบบของปั๊มในโหมคเทอร์ไบน์ (Carravetta, A. et al. 2018)

โดยปกติ PaT มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเทอร์ไบน์ทั่วไปที่ใช้ในขนาดเดียวกัน รูปที่ 2.16 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องจักรต่างๆ พบว่า PaT มีประสิทธิภาพต่ำกว่าแม้ที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้กราฟประสิทธิภาพของ PaT ในช่วงอัตราไหลต่ำๆ เป็นเส้นโค้งแคบ นั้นหมายความว่า PaT สามารถใช้งานได้ในช่วงหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นการแก้ไขโครงสร้างหรือรูปทรงของปั๊มจะช่วยเพิ่มช่วงการใช้งานในโหมคเทอร์ไบน์ได้ โดยสามารถปรับแต่ง PaT ได้ 3 ส่วน

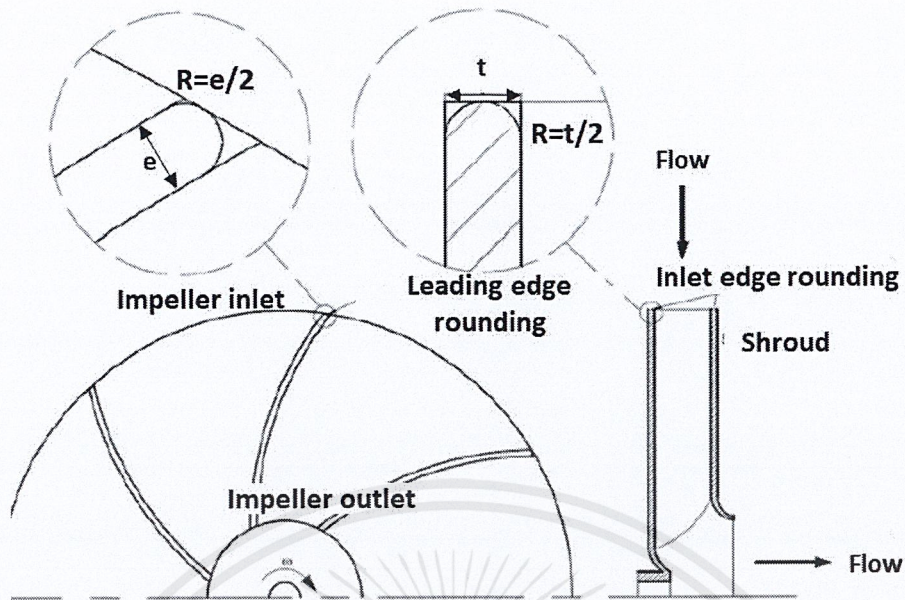


รูปที่ 2.16 ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ชนิดต่างๆ และปั๊มในโหมคเทอร์ไบน์

(Jain, S.V. and Patel, R.N. 2014)

2.5.3.1 ใบพัด

1) การมนครีบบใบพัด (Blade) และจานประกบ (Shroud) ที่ขอบด้านขาเข้า รูปที่ 2.17 แสดงการปรับแต่งขอบขอบทั้งครีบบใบพัดและขอบแหลมของจานประกบที่ด้านทางเข้าใบพัดของ PaT ที่ครีบบใบพัด รัศมีของขอบมนจะเป็นครึ่งหนึ่งของความหนาของครีบบใบพัด ส่วนที่จานประกบ จะทำการมนขอบทั้งด้านนอกและด้านใน เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดจากการแยกชั้นของของไหล (Flow separation)

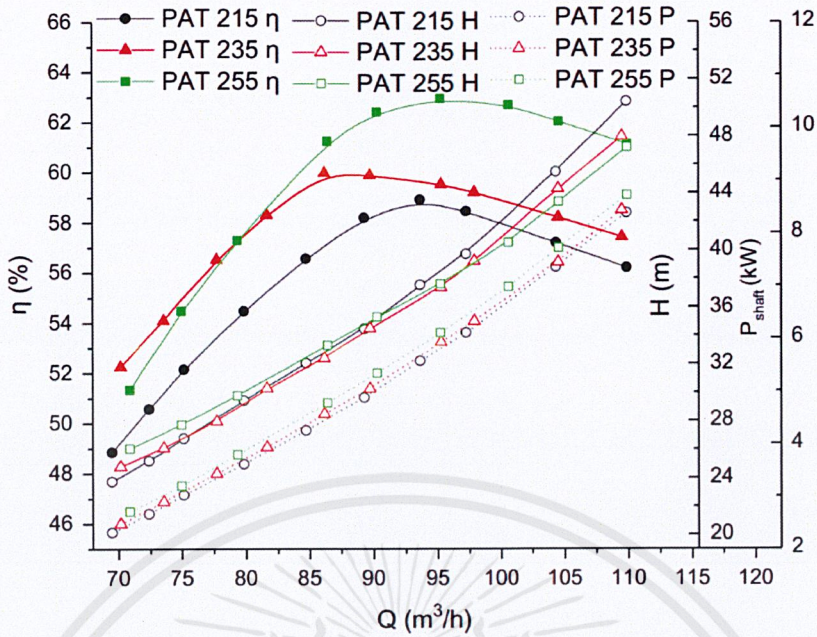


รูปที่ 2.17 การมนขอบของครีบบใบพัดที่งานประกบที่ขอบทางเข้าใบพัด

(Derakhshan, S. et al. 2009)

การมนขอบของครีบบใบพัดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดของ PaT ได้สูงสุด 5% และช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากการแยกชั้นของของไหลที่ครีบบใบพัด

2) เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของใบพัด (S.S. Yang et al., 2012) การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดโดยไม่เปลี่ยนแปลงขนาดตัวเรือนของปั๊ม เป็นสิ่งที่ผู้ผลิตปั๊มจะปรับปั๊มตามที่คุณต้องการ แต่จะทำให้ประสิทธิภาพของปั๊มนั้นลดลง รวมไปถึงเฮดและอัตราการไหลด้วย เช่นเดียวกันกับ PaT ดังแสดงในรูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างกราฟของ PaT ที่มีขนาดใบพัดต่างๆ (255, 235 และ 215 mm) พบว่าเมื่อขนาดของใบพัดเล็กลงจาก 255 เป็น 215 mm ประสิทธิภาพของ PaT ที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด (BEP) ลดลง 4.11% กราฟเฮดมีความชันมากขึ้นและกราฟกำลังเลื่อนต่ำลง ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการลดขนาดของใบพัด เนื่องจากทำให้ประสิทธิภาพของ PaT ลดลง

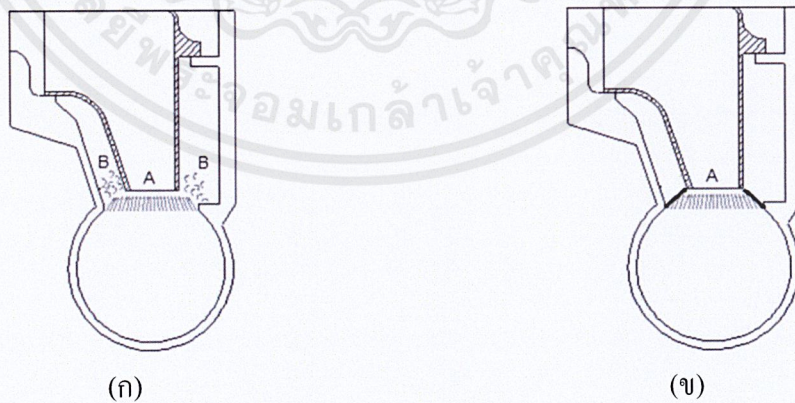


รูปที่ 2.18 เสด กำลัง และประสิทธิภาพของ PaT ที่ขนาดใบพัดต่างๆ

(Yang, S.S. et al., 2012)

2.5.3.2 การปรับแต่งส่วนทางเข้าและทางออก

รูปที่ 2.19 แสดงรูปแบบการไหลที่หอยโข่ง (Volute) และทางเข้าใบพัด เมื่อไม่มีครีบบังคับทิศทางการไหล (Guide vane) ทำให้เกิดการไหลที่ช่องว่างระหว่างหอยโข่งกับใบพัดจึงจำเป็นต้องใช้ Rib ทำหน้าที่เป็นครีบบังคับทิศทางการไหลแบบอยู่กับที่ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด (BEP) ของ PaT ได้ 1% (Singh, P. 2005)



A = ทางเข้าใบพัด

B = หอยโข่ง

รูปที่ 2.19 รูปแบบการไหลของของไหล (ก) ก่อนเพิ่ม Rib และ (ข) หลังจากเพิ่ม Rib

(Derakhshan, S. 2008)

นอกเหนือจากการปรับแต่งที่ด้านทางเข้าแล้ว การจัดเรียงองค์ประกอบที่ด้านทางออกก็สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้ ตามการจัดเรียงของรีแอกชันเทอร์ไบน์ ที่รับน้ำที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ให้เป็นพลังงานศักย์ช่วยลดการสูญเสียการไหล และช่วยเพิ่มความดันด้านทางออกของไบพัดเพื่อป้องกันการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation)

2.6 ความสูญเสียในระบบท่อ (Cengel, Y.A. and Cimbala, J.M. 2017)

2.6.1 ความสูญเสียหลัก (Major loss)

ของไหลที่ไหลในท่อตรงนั้น การสูญเสียขึ้นมาจากแรงเสียดทานระหว่างชั้นของของไหลที่อยู่ติดกับผนังท่อหรือความหนืด โดยความดันที่สูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทาน ΔP สามารถหาได้จากสมการที่ 2.6

$$\Delta P_f = \rho f \frac{L V^2}{D 2} \quad (2.6)$$

โดยที่

- ΔP_f = ผลต่างของความดัน, Pa
- ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
- f = ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ (Friction factor)
- L = ความยาวท่อ, m
- D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m
- V = ความเร็วของการไหล, m/s

รูปแบบการการไหลสามารถแบ่งชนิดได้โดยใช้พารามิเตอร์ที่ไม่มีมิติที่เรียกว่า ค่าเรย์โนลด์ (Reynolds number) เป็นตัวกำหนดในการแยกชนิดของการไหล ค่าเรย์โนลด์ ดังสมการที่ 2.7

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.7)$$

แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) การไหลแบบผสม (Transition flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

$$\text{Re} = \begin{cases} < 2,300 & ; \text{Laminar} \\ 2,300 - 4,000 & ; \text{Transition} \\ > 4,000 & ; \text{Turbulent} \end{cases}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ
กรณีการไหลแบบราบเรียบ

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.8)$$

กรณีการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับท่อที่มีผิวขรุขระสามารถอ่านค่า f ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re (Moody diagram)

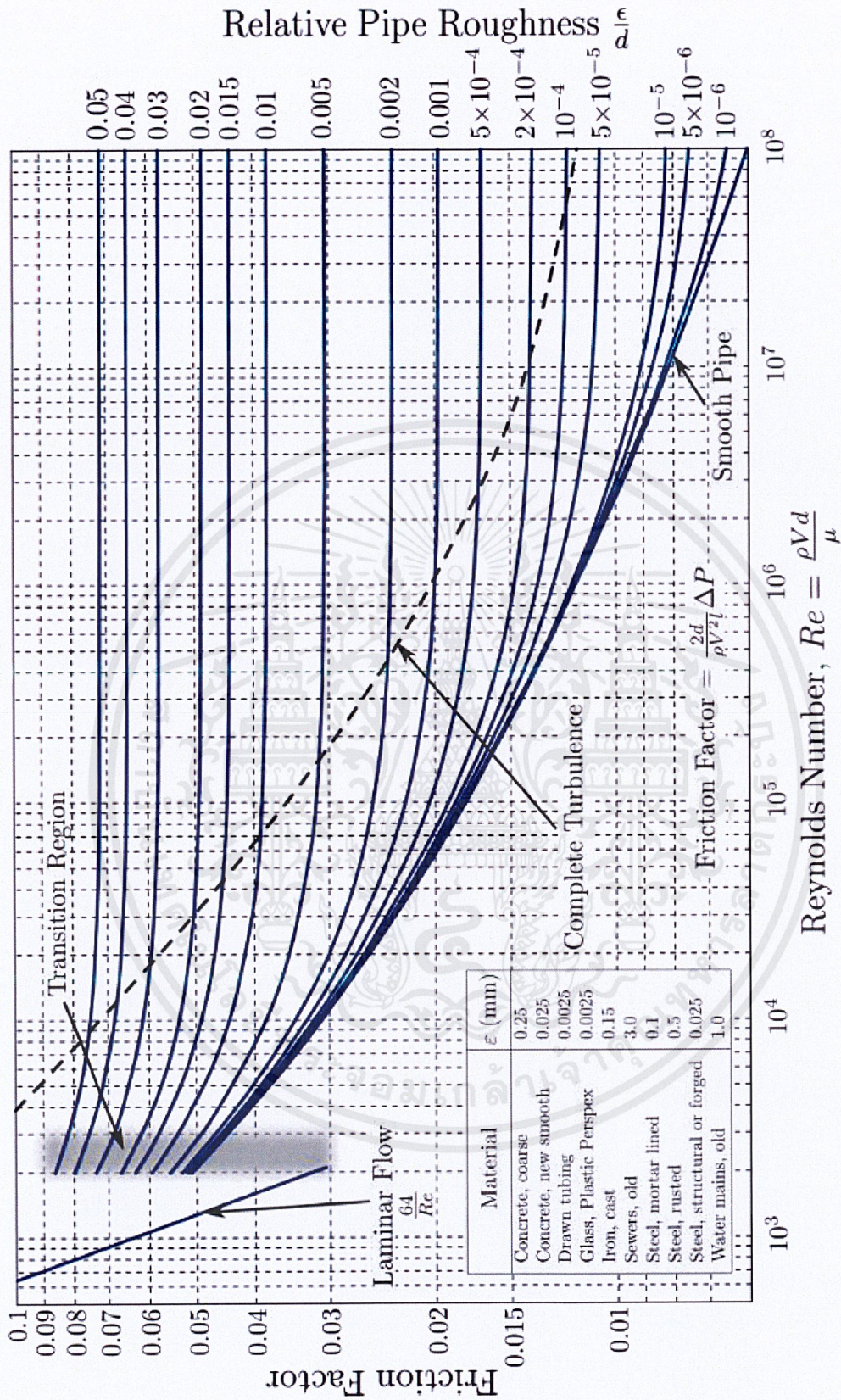
2.6.2 ความสูญเสียรอง (Minor loss)

การสูญเสียรองเกิดจากการที่ของไหลไหลผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ เช่น วาล์ว ข้อต่อ ท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่และทางแยกต่างๆ คำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$\Delta P_m = \sum K_L \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.9)$$

โดยที่

K = สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Loss coefficient)



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อและค่าเรย์โนลด์ (Tom Davis, 2008)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึ๒5๙เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น (Preliminary economic evaluation) (อนุรักษ์ ทองสุโขวงศ์. 2554)

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของโครงการ ในการวิเคราะห์ด้านการเงิน ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าของเงินคือ เวลา และ อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราผลตอบแทน มูลค่าของเงินจะเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา ขึ้นอยู่กับอัตราผลตอบแทนหรือดอกเบี้ย การวิเคราะห์มูลค่าของเงินที่แปรผันไปตามช่วงเวลาและอัตราดอกเบี้ย นิยมนำเสนอในรูปแบบของแผนผังกระแสเงินสด

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราดอกเบี้ยหรือผลตอบแทน เวลา และค่าของเงิน

ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์มูลค่าของเงิน และแผนผังกระแสเงินสด ได้แก่

P = มูลค่าหรือผลรวมของเงินในช่วงเวลาที่กำหนดให้เป็นปัจจุบัน (Present worth, Present value หรือ Capital cost)

F = มูลค่าหรือผลรวมของเงินในอนาคต (Future worth หรือ Future value)

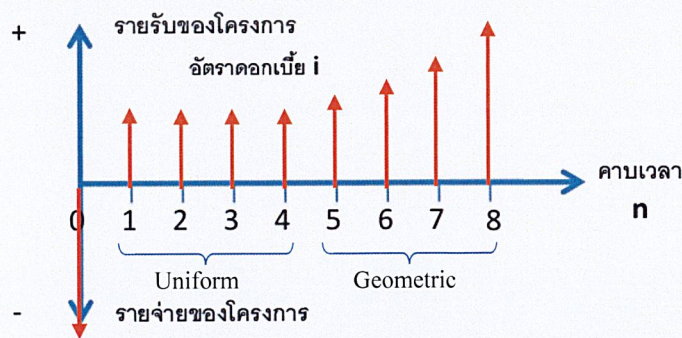
A = มูลค่าของเงินรายเดือนหรือรายปี ที่มีค่าสม่ำเสมอเท่ากัน (Annual worth หรือ Equivalent uniform annual worth)

n = จำนวนช่วงเวลาสำหรับการวิเคราะห์ หน่วย ปี เดือน หรือวัน

i = อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราผลตอบแทนต่อช่วงเวลา หน่วย เปอร์เซ็นต์ต่อปี เปอร์เซ็นต์ต่อเดือน หรือเปอร์เซ็นต์ต่อวัน

2.7.1 แผนผังกระแสเงินสด (Cash flow diagram)

เป็นแผนภูมิแสดงรายรับและรายจ่ายในช่วงเวลาต่างๆ โดยเป็นช่วงเวลาที่มีการจ่ายดอกเบี้ยเป็นรายปี เวลาที่ $t=0$ หมายถึง เวลาปัจจุบัน เวลาที่ $t=1, 2, \dots, n$ หมายถึง เวลาปีที่ 1, 2 ถึงปีใดๆ โดยรายรับหรือกระแสเงินเข้า แสดงลูกศรชี้ขึ้น ส่วนรายจ่ายหรือกระแสเงินออกจะแสดงลูกศรชี้ลง ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ผลลัพธ์ของการหักลบกันระหว่างกระแสเงินเข้าและกระแสเงินออกภายในงวดเดียวกัน เรียกว่า กระแสเงินสดสุทธิ ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้



รูปที่ 2.21 แผนผังกระแสเงินสด (ไพบูลย์ แยมเพื่อน. 2546)

2.7.2 การคำนวณผลรวมค่าเดียว (Single-sum calculation)

มูลค่าเงินในอนาคต (F) จากเงินจำนวนเดียวกันที่มีอยู่ในปัจจุบัน (P) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$F = P(1+i)^n \quad (2.10)$$

โดยที่ $(1+i)^n$ เรียกว่า Single-sum compound amount factor เขียนสัญลักษณ์ได้เป็น $(F/P, i\%, n)$ หรืออาจคำนวณค่าเงินในปัจจุบัน (P) เมื่อทราบจำนวนเงินในอนาคต (F) ได้จากสมการ 2.11

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (2.11)$$

โดยที่ $\frac{1}{(1+i)^n}$ เรียกว่า Single-sum present worth factor เขียนสัญลักษณ์ได้เป็น $(P/F, i\%, n)$

2.7.3 การคำนวณเงินเท่ากันแบบสม่ำเสมอตามช่วงเวลา (Uniform series formulas)

ในวิธีนี้ เป็นการพิจารณาเงินที่เป็นแบบรายเดือน หรือรายปี ตามระยะเวลาและอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด โดยอาจกำหนดจำนวนเงินที่มีค่าสม่ำเสมอตามช่วงเวลาและหาจำนวนเงินในปัจจุบัน หรือกำหนดเงินในปัจจุบันแล้วหาเงินตามช่วงเวลาที่ต้องการ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (2.12)$$

$$A = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]; i \neq 0 \quad (2.13)$$

โดย $\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$ เรียกว่า Uniform-series present worth factor เขียนสัญลักษณ์ได้เป็น $(P/A, i\%, n)$

และ $\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$ เรียกว่า Capital recovery factor เขียนสัญลักษณ์ได้เป็น $(A/P, i\%, n)$

2.7.4 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (The rate of return method)

เป็นการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนที่จะได้รับการลงทุนในโครงการและนำไปเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำ (Minimum attractive rate of return, MARR) เป็นอัตราผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับน้อยที่สุดเมื่อมีการลงทุน โดยทั่วไปจะมีค่าสูงกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินฝากหรืออัตราดอกเบี้ยเงินกู้ ถ้าอัตราผลตอบแทนที่คำนวณได้ (i) มีค่ามากกว่า MARR สรุปได้ว่าโครงการนั้นมีความเหมาะสมในการลงทุน ทั้งนี้ อัตราผลตอบแทนที่คำนวณได้คือ อัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน (PWD) มีค่าเท่ากับมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของผลตอบแทน (PWB) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.14

$$PW_{D,i\%} = PW_{B,i\%}$$

หรือ

$$0 = PW_{B,i\%} - PW_{D,i\%} \quad (2.14)$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

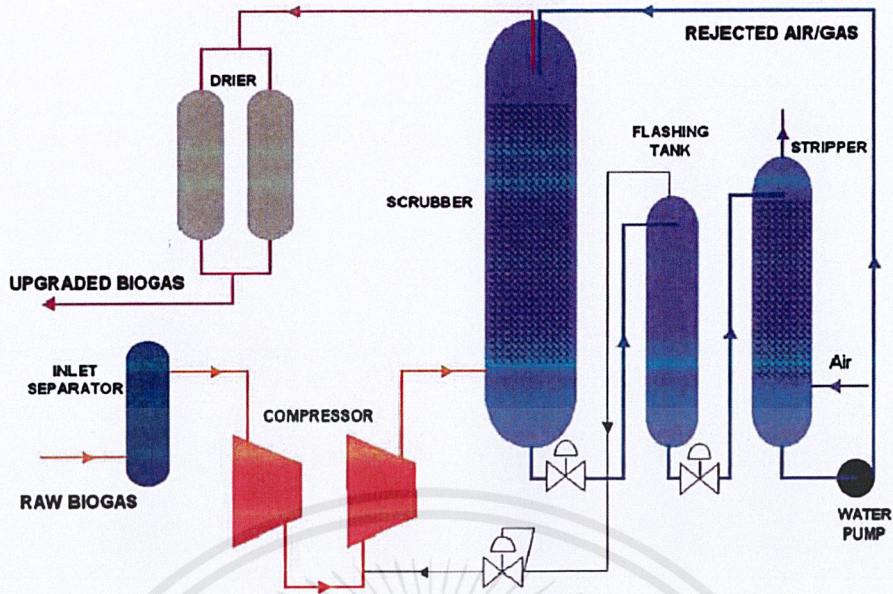
2.8.1 งานวิจัยของ Pradeep Bansal และ Nick Marshall (Bansal, P and Marshall, N. 2010)

Pradeep Bansal และ Nick Marshall ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำพลังงานที่สูญเสียกลับมาใช้ใหม่จากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพโดยใช้เทอร์โบปัม (HPRT)

รายละเอียดงานวิจัยของ Pradeep Bansal และ Nick Marshall มีดังนี้

2.8.1.1 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพดิบจะถูกส่งไปยังโรงงานดังแสดงในรูปที่ 2.22 ที่ความดันบรรยากาศและอิ่มตัวด้วยน้ำ (RH 100%) ความชื้นและอนุภาคจะถูกแยกที่ถังแยก (Separator) แก๊สชีวภาพจะถูกเพิ่มความดันถึง 9 barg และถูกทำให้เย็นตัวลง แก๊สชีวภาพที่ความดันสูงนี้เข้าสู่หอ Scrubber ที่ด้านล่างและไหลสวนทางกับน้ำที่มีความดันเท่ากัน สิ่งปนเปื้อน เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถูกดูดซึมลงไปใต้น้ำทำให้เหลือแก๊สมีเทนที่มีความบริสุทธิ์ 97–98% น้ำเสียที่ออกจากหอ Scrubber จะถูกลดความดัน ในขณะที่แก๊สชีวภาพบริสุทธิ์ถูกทำให้แห้งในหอดูดซับหากผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์ แก๊สชีวภาพจะถูกนำกลับมาเข้ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพอีกครั้ง โดยผ่านเข้าสู่คอมเพรสเซอร์ น้ำในหอ Scrubber จะดูดซับแก๊สมีเทนเอาไว้บางส่วน แก๊สมีเทนนี้จะถูกแยกออกจากน้ำที่ความดันปานกลางในถังแยกและกลับสู่คอมเพรสเซอร์เพื่อลดการสูญเสียแก๊สมีเทน จากนั้นน้ำในกระบวนการผลิตจะเข้าสู่หอ Stripper ซึ่งจะแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำที่ความดันบรรยากาศและน้ำสะอาดจะถูกสูบจากหอ Stripper กลับเข้าไปที่หอ Scrubber อีกครั้ง



รูปที่ 2.22 แผนผังกระบวนการบำบัดแก๊สชีวภาพ (Bansal, P and Marshall, N. 2010)

2.8.1.2 ชนิดของเทอร์ไบน์

งานวิจัยนี้ได้เลือกชนิดของเทอร์ไบน์ โดยทำการเปรียบเทียบเทอร์ไบน์ 3 ชนิด ได้แก่

- 1) เพลดันเทอร์ไบน์ เหมาะสำหรับการใช้งานที่มีอัตราการไหลสูง และของไหลความดันสูง ถูกลดความดันสู่ความดันบรรยากาศ
- 2) ฟรานซิสเทอร์ไบน์ เหมาะสำหรับระบบที่มีความดันต่ำและมีอัตราการไหลสูง นิยมใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดใหญ่
- 3) ปัมทำงานแบบกลับทิศทางการไหล

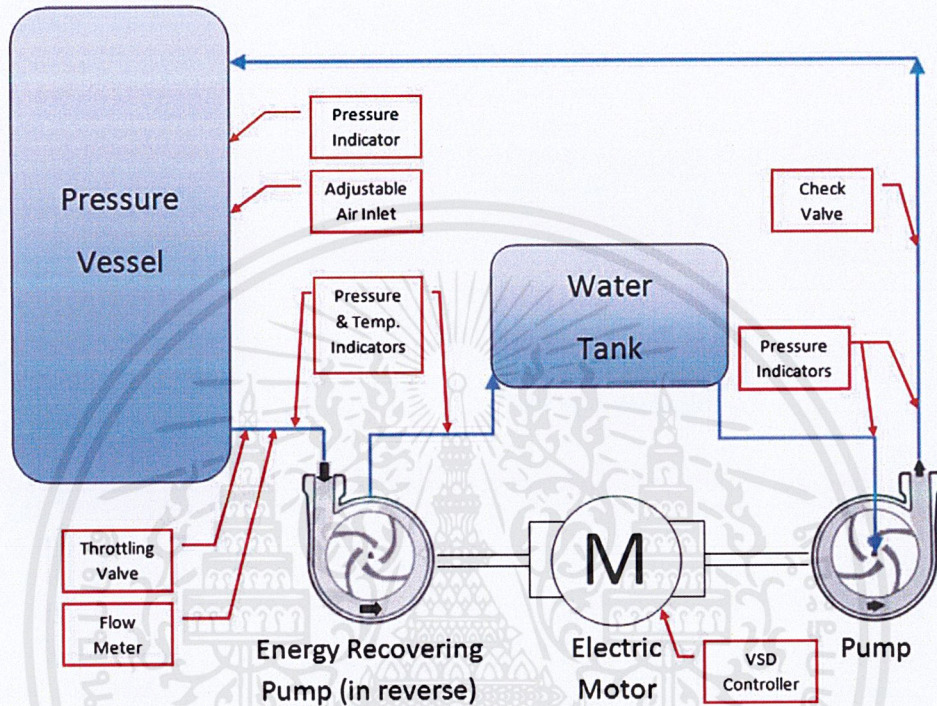
เทอร์ไบน์มีความเหมาะสมกับการใช้งานแต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านจำนวนของผู้ผลิตเทอร์ไบน์ และต้องใช้ต้นทุนในการลงทุนสูง จึงเลือกใช้ปัมที่ทำงานแบบกลับทิศทางการไหล ที่มีต้นทุนต่ำกว่า ติดตั้งได้ง่าย ต้องการการบำรุงรักษาน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเทอร์ไบน์

2.8.1.3 การจัดเรียงอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต

การจัดเรียงอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.23 ระบบทำงานแบบวงจรรีระหว่างถึงความดันสูงและถึงเก็บน้ำ น้ำถูกสูบจากถังเก็บน้ำไปยังถึงความดันสูงก่อนที่จะถูกลดความดันผ่านเทอร์ไบน์สู่ความดันบรรยากาศในถังเก็บน้ำ ปัมและปัมแบบกลับทิศทางการไหลเชื่อมต่อกับมอเตอร์เพลาคู น้ำที่มีความดัน 4 barg ออกจากถึงความดันสูง ไหลผ่านปัมแบบกลับทิศทางการไหลผลิตพลังงานกล ลดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์

ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

1. มอเตอร์ไฟฟ้า: WEG 5.5 kW 2900 RPM สองเฟลา
2. ปั๊ม: ปั๊มหอยโข่ง เฮด 45 m
3. เทอร์ไบน์: ปั๊มหอยโข่ง เฮด 32 m



รูปที่ 2.23 การจัดเรียงอุปกรณ์ต่างๆ ในกระบวนการบำบัดแก๊สชีวภาพ

(Bansal, P and Marshall, N. 2010)

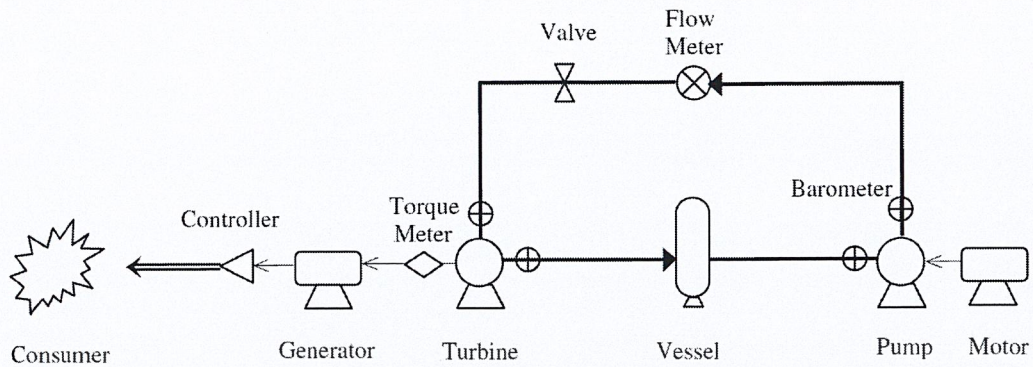
จากผลการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำพลังงานที่สูญเสียกลับมาใช้ใหม่ได้สูงถึง 25% โดยใช้ปั๊มแบบกลับทิศทางการไหล

2.8.2 งานวิจัยของ Shahram Derakhshan และ Ahmad Nourbakhsh (Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A. 2008)

S. Derakhshan และ A. Nourbakhsh ทดสอบปั๊มหอยโข่งแบบกลับทิศทางการไหล 4 เครื่องเพื่อหาสมรรถนะของปั๊มเมื่อทำงานในโหมดเทอร์ไบน์

2.8.2.1 การทดลอง

แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กติดตั้งในมหาวิทยาลัย Tehran ดังแสดงในรูปที่ 2.24 อัตราการไหลและเฮดที่ไหลเข้า PaT ถูกกำหนดโดยเครื่องสูบน้ำในการทดลอง วัดอัตราการไหลที่ท่อออกของเครื่องสูบน้ำโดยใช้แผ่นอริฟิส และวัดความดันโดยใช้บารอมิเตอร์ที่มีช่วงอยู่ระหว่าง 0-5 bar

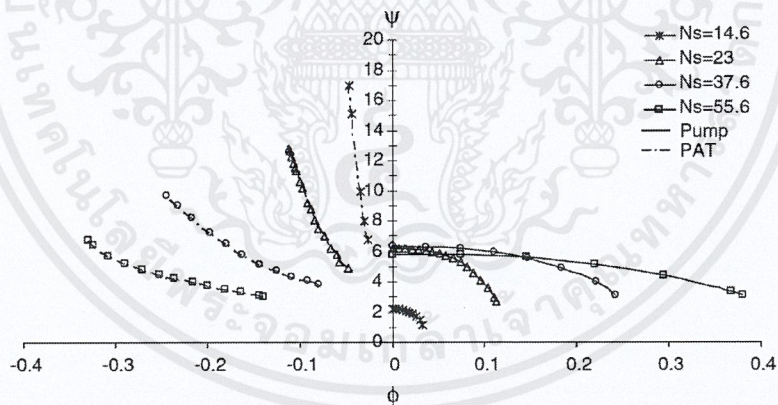


รูปที่ 2.24 แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก (Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A. 2008)

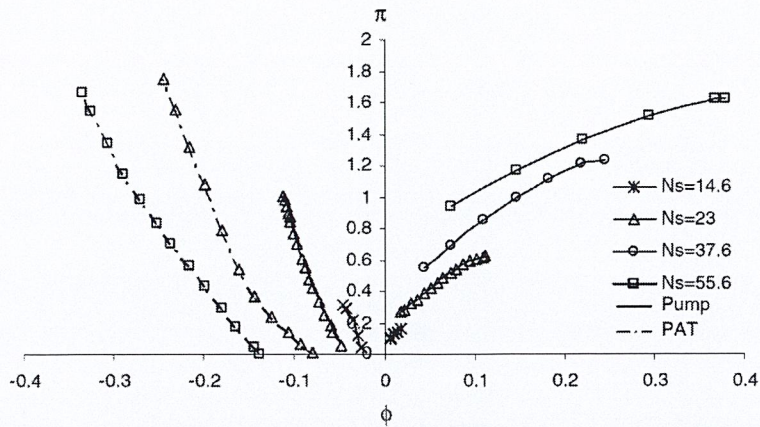
ปั๊ม 4 ตัวที่เลือกใช้ในการทดลองมีความเร็วจำเพาะอยู่ในช่วง 14 – 56 Ns มีกำลังไฟฟ้าด้านขาเข้า
 เซด และอัตราการไหล 30 kW 25 m และ 0.15 m³/s ตามลำดับ

2.8.2.2 ผลการทดลอง

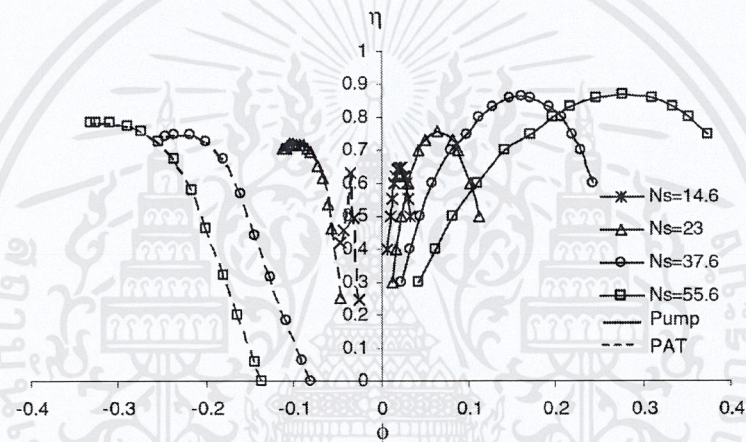
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปั๊มหอยโข่งสามารถทำงานเป็นเทอร์ไบน์ที่
 ความเร็วรอบ เซดและอัตราการไหลที่ต่างๆ ได้ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.25 -2.27



รูปที่ 2.25 กราฟเฮดไร้หน่วยของ PaT (Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A. 2008)



รูปที่ 2.26 กราฟกำลังไร้หน่วยของ PaT (Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A. 2008)



รูปที่ 2.27 กราฟประสิทธิภาพของ PaT (Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A. 2008)

โดยที่

$$\text{Discharge number: } \phi = \frac{Q}{nD^3}$$

$$\text{Head number: } \psi = \frac{gH}{n^2 D^2}$$

$$\text{Power number: } \pi = \frac{P}{\rho n^3 D^5}$$

2.8.2.3 สรุปผลการทดลอง

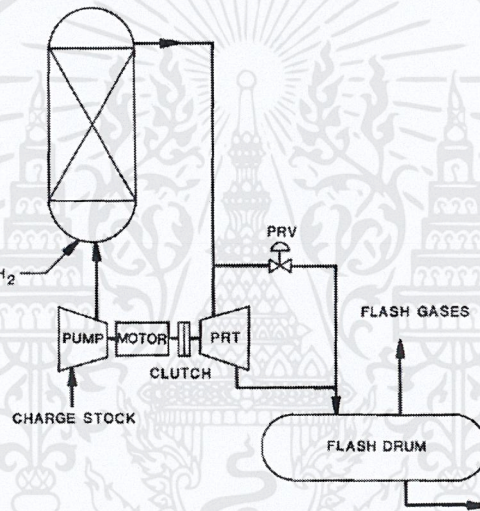
- ปัมพ์หอยโข่งสามารถทำงานในโหมดเทอร์ไบน์ที่ความเร็วรอบ เสด และอัตราการไหลต่างๆ ได้
- PaT ทำงานที่เสดและอัตราการไหลสูงกว่าในโหมดของปัมพ์ที่ความเร็วรอบเดียวกัน
- ประสิทธิภาพของทั้ง 2 โหมดมีค่าใกล้เคียงกัน

2.8.3 งานวิจัยของ Gopalakrishnan S. (Gopalakrishnan, S. 1986)

Gopalakrishnan, S. ศึกษาการทำงานของปั๊มกลับทิศทางการไหล (PaT) และหลักการทำนายประสิทธิภาพของ PaT จากปั๊มที่ทราบประสิทธิภาพด้วยวิธีการทดลอง

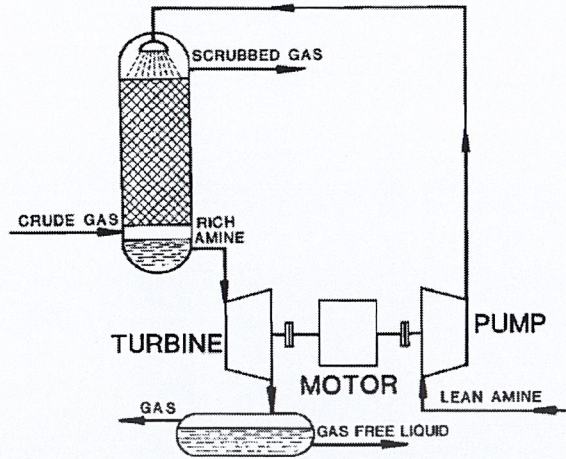
2.8.3.1 พื้นที่การใช้งานของ PaT

1) กระบวนการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนหรือกระบวนการกำจัดกำมะถันในน้ำมัน โดยใช้แก๊สไฮโดรเจน น้ำมันถูกบำบัดด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิและความดันสูง น้ำมันที่ความดันสูงจะประกอบไปด้วยแก๊สที่ละลายอยู่ เช่น มีเทน อีเทน ซึ่งสามารถกลายเป็นแก๊สเมื่อความดันลดลง การใช้เทอร์ไบน์เพื่อผลิตกำลังให้กับมอเตอร์ปั๊มในกระบวนการกำจัดกำมะถันในน้ำมัน โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 กระบวนการบำบัดด้วยแก๊สไฮโดรเจน (Gopalakrishnan, S. 1986)

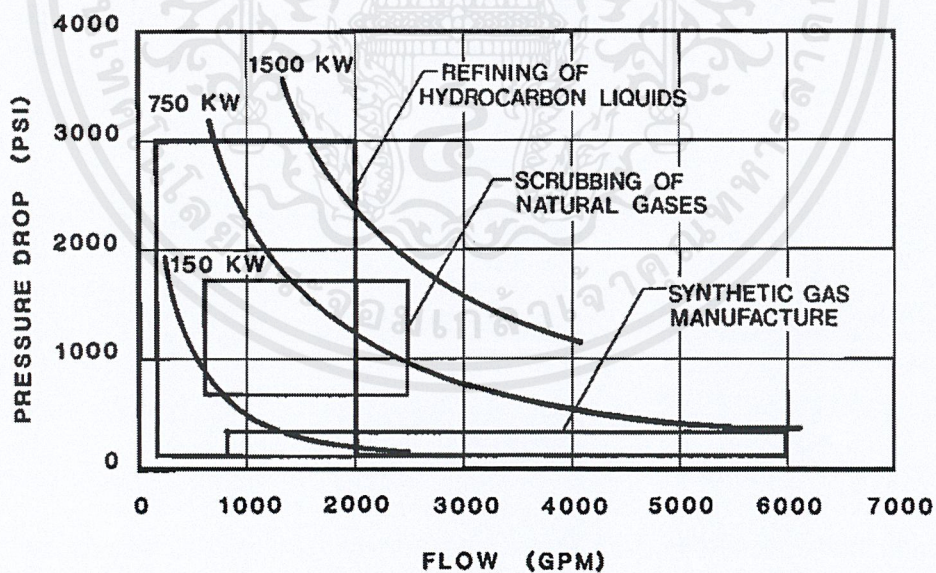
2) กระบวนการสแคร็บเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน ซึ่งเป็นแก๊สที่ประกอบไปด้วยสิ่งเจือปน เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สารละลายเอมีน (Lean amine) เข้าสแคร็บเบอร์เพื่อดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กลายเป็นสารละลายเอมีนเจือจาง (Rich amine) ใช้ขับเคลื่อนเทอร์ไบน์เพื่อผลิตพลังงานกล แสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 กระบวนการสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน (Gopalakrishnan, S. 1986)

3) กระบวนการผลิตแอมโมเนีย มีระบบคล้ายกับกระบวนการสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนในข้อ 2)

เสดและอัตราการไหลที่สามารถใช้เทอร์ไบน์ในกระบวนการต่างๆ ได้ แสดงดังรูปที่ 2.30 กราฟกำลังที่แสดงในรูปที่ 2.30 คำนวณที่ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์-เคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 70% ซึ่งมีความสามารถในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ได้ตั้งแต่ 150 kW ถึง 1500 kW



รูปที่ 2.30 ช่วงการใช้งานเทอร์ไบน์ในอุตสาหกรรมน้ำมัน (Gopalakrishnan, S. 1986)

บทที่ 3

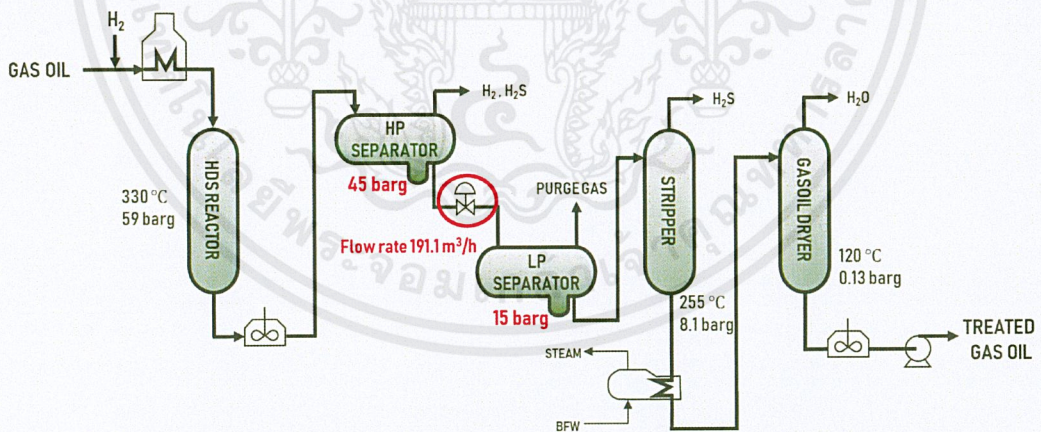
วิธีการดำเนินโครงการ

โครงการนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงกลั่นน้ำมันด้วยการติดตั้งเทอร์ไบน์แทนวาล์วลดความดันเพื่อนำพลังงานความดันของของไหลมาใช้ขับเคลื่อนเทอร์ไบน์เพื่อให้ได้พลังงานกลใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 ศึกษากระบวนการกลั่นน้ำมัน

ศึกษากระบวนการผลิตของโรงงานเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งเทอร์ไบน์ โดยพิจารณาหน่วยปฏิบัติการที่ปฏิบัติการที่ภาวะความดันสูงและมีการติดตั้งวาล์วลดความดันเพื่อลดความดันให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ถัดไป จากการสำรวจพบว่า หน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์ หลังจากกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์ถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่เครื่องปฏิกรณ์แล้ว จะเข้าไปในถังแยกความดันสูง 45 barg เพื่อแยกแก๊สไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากน้ำมัน จากนั้นจะถูกลดความดันด้วยวาล์วและเข้าสู่ถังแยกความดันต่ำ 15 barg เพื่อแยกไฮโดรคาร์บอนชนิดเบาที่กลายเป็นแก๊สเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดัน ดังรูปที่

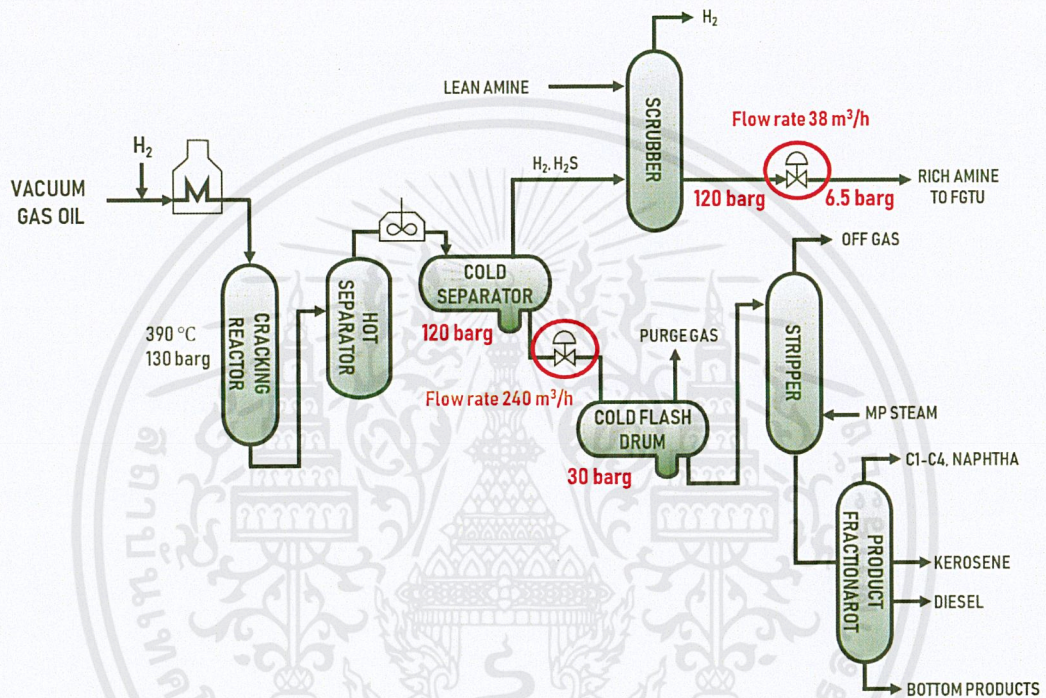
3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตอย่างง่ายของหน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์

หน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน หลังจากน้ำมันผ่านเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเปลี่ยนน้ำมันหนักให้กลายเป็นน้ำมันเบาและเปลี่ยนกำมะถันให้เป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยการเติมไฮโดรเจนแล้ว จะเข้าสู่ถังแยกเย็น (Cold separator) เพื่อแยกแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความดัน 120 barg และผ่านวาล์วลดความดันเข้าสู่ Cold flash drum เพื่อแยกไฮโดรคาร์บอนเบาที่มีสถานะ

แก๊สที่ความดัน 30 barg และหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากถังแยกเย็นจะเข้าสู่หอสครับเบอร์โดยใช้สารละลายเอมีน (Lean amine) ดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สไฮโดรเจนที่ความดัน 120 barg หลังจากนั้นสารละลายเอมีนที่ดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไว้ (Rich amine) จะถูกลดความดันผ่านวาล์วจนมีความดัน 6.5 barg เพื่อเข้าสู่หอกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากสารละลายเอมีน (Regenerator) ที่หน่วย FG TU ดังรูปที่ 3.2 ภาวะปฏิบัติการและสมบัติของสารแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตอย่างง่ายของหน่วยแตกโมเลกุลด้วยแก๊สไฮโดรเจน

3.2 ศึกษาหลักการการทำงานของระบบเทอร์ไบน์และเลือกประเภทของเทอร์ไบน์

ศึกษาหลักการการทำงานของเทอร์ไบน์แต่ละประเภท ได้แก่ อิมพัลส์เทอร์ไบน์ รีแอกชันเทอร์ไบน์ และปั๊มทำงานในโหมดเทอร์ไบน์ และเลือกประเภทของเทอร์ไบน์โดยเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของอิมพัลส์เทอร์ไบน์ รีแอกชันเทอร์ไบน์ และปั๊มทำงานในโหมดเทอร์ไบน์

3.3 จำนวนพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้

3.3.1 กำลังของของไหล

ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จากเทอร์ไบน์ ต้องทราบกำลังของของไหลที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยพิจารณาจากอัตราการไหลของของไหล คุณสมบัติและภาวะการทำงาน ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$W_{hyd} = \frac{Q\rho g\Delta h}{3,600,000} \quad (3.1)$$

หรือ

$$W_{hyd} = \frac{Q\Delta P}{3,600,000} \quad (3.2)$$

โดยที่

- W_{hyd} = กำลังของของไหล, kW
- Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร, m^3/h
- ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
- g = ความเร่งโน้มถ่วง, m/s^2
- Δh = ผลต่างของเฮด, m
- ΔP = ผลต่างของความดัน, Pa

3.3.2 พลังงานไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์สามารถผลิตได้

พลังงานไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์สามารถผลิตได้นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำงานหรือประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หากระบบมีประสิทธิภาพสูงจะสามารถนำพลังงานที่สูญเสียมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้มาก ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$E_{exp} = (W_{hyd} \cdot \eta_{HPRT} \cdot \eta_{gen})t \quad (3.3)$$

โดยที่

- E_{exp} = พลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้, kWh
- η_{HPRT} = ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์
- η_{gen} = ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- t = ระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์, h

โดยทั่วไป ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์จะสูงกว่า 80% สำหรับน้ำ และสูงกว่า 70% สำหรับของไหลหนืด เช่น ปิโตรเลียม

3.3.3 ค่าไฟฟ้า

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = E_{\text{exp}} \times \text{ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย} \quad (3.4)$$

แสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข.

3.4 พิจารณาอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบเทอร์โบไบน์และตำแหน่งการติดตั้ง

ศึกษาอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นในระบบเทอร์โบไบน์ เช่น วาล์วลดความดัน บายพาสวาล์ว คลัทช์ และพิจารณาดำเนินการติดตั้งเทอร์โบไบน์ในหน่วยปฏิบัติการ พร้อมทั้งพิจารณาการวางท่อเพิ่มเติม และคำนวณความดันตกของระบบท่อที่ติดตั้งใหม่ แสดงตัวอย่างการติดตั้งเทอร์โบไบน์ในหน่วยปฏิบัติการและการคำนวณความดันตกในระบบท่อในภาคผนวก ข.

3.5 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากโครงการนี้ศึกษาเทอร์โบไบน์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊ส ออยล์และหน่วยแตกโมเลกุลด้วยแก๊สไฮโดรเจน และศึกษาเทอร์โบไบน์ขับเคลื่อนมอเตอร์ปั๊มที่หน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน จึงทำการเปรียบเทียบงานวิจัยของ Gopalakrishnan, S. กับหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน โดยเปรียบเทียบรูปที่ 2.30 กับภาวะปฏิบัติการของหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนและประมาณราคาอุปกรณ์และค่าติดตั้งโดยอ้างอิงจากงานวิจัย

3.6 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

วิเคราะห์อัตราผลตอบแทนในเชิงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นจากต้นทุนทรัพย์สินสุทธิ คือ ราคาอุปกรณ์ ได้แก่ HPRT ปั๊ม มอเตอร์ คลัทช์ และค่าติดตั้งอุปกรณ์ (อ้างอิงข้อมูลราคาของอุปกรณ์และค่าติดตั้งจากงานวิจัยของ Gopalakrishnan, S.) โดยไม่ได้พิจารณาถึงค่าติดตั้งระบบท่อ ระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ผลตอบแทนพิจารณาจากปริมาณไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ (อ้างอิงราคาไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวงปี พ.ศ. 2560) กำหนดอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำ 15% ระยะเวลาโครงการ 5 ปี วิเคราะห์อัตราผลตอบแทนจากสมการ 2.14

$$PW_{D,i\%} = PW_{B,i\%}$$

หรือ

$$0 = PW_{B,i\%} - PW_{D,i\%} \quad (2.14)$$

บทที่ 4

ผลการดำเนินโครงการ

4.1 ประเภทของเทอร์ไบน์

การเลือกชนิดของเทอร์ไบน์ จากการแบ่งประเภทตามวิธีการแปลงพลังงานของเทอร์ไบน์แบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ อิมพัลส์เทอร์ไบน์และรีแอกชันเทอร์ไบน์ ทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทอร์ไบน์ทั้ง 2 ชนิด

ตารางที่ 4.1 ข้อดีและข้อเสียของอิมพัลส์เทอร์ไบน์และรีแอกชันเทอร์ไบน์ (Rajput, R.K. 2005 ; Carravetta A. et al. 2018)

ชนิด	ข้อดี	ข้อเสีย
อิมพัลส์เทอร์ไบน์	<ul style="list-style-type: none">• ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย• มีราคาต่ำกว่าที่พิกัดกำลังเดียวกัน• บำรุงรักษาได้ง่าย	<ul style="list-style-type: none">• ประสิทธิภาพต่ำ ที่อัตราการผลิตและภาวะปฏิบัติการเดียวกัน• ปฏิบัติการที่ความดันบรรยากาศ
รีแอกชันเทอร์ไบน์	<ul style="list-style-type: none">• ประสิทธิภาพสูง ที่อัตราการผลิตและภาวะปฏิบัติการเดียวกัน• ปฏิบัติการที่ภาวะสูงกว่าความดันบรรยากาศ	<ul style="list-style-type: none">• ต้องการพื้นที่มาก• มีราคาสูงกว่าที่พิกัดกำลังเดียวกัน• บำรุงรักษายากกว่าอิมพัลส์เทอร์ไบน์

จากตารางที่ 4.1 พบว่าอิมพัลส์เทอร์ไบน์ไม่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตของโรงงานเนื่องจากความดันขาออกจากอิมพัลส์เทอร์ไบน์จะเท่ากับความดันบรรยากาศ แต่ในกระบวนการผลิตของโรงงานปฏิบัติการที่ภาวะความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นจึงเลือกใช้รีแอกชันเทอร์ไบน์

เนื่องจากปั๊มที่กลับทิศทางการไหลหรือปั๊มที่ทำงานในโหมดเทอร์ไบน์มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับรีแอกชันเทอร์ไบน์ จึงทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของรีแอกชันเทอร์ไบน์และปั๊มหอยโข่งที่ทำงานในโหมดเทอร์ไบน์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อดีและข้อเสียของรีแอกชันเทอร์ไบน์และปั๊มทำงานในโหมดเทอร์ไบน์
(Teuteberg, B.H. 2010)

ชนิด	ข้อดี	ข้อเสีย
รีแอกชันเทอร์ไบน์	<ul style="list-style-type: none"> • มีประสิทธิภาพสูงกว่า • มีครีบบังคับทิศทางการไหล (Guide vane) สำหรับอัตราการไหลที่ไม่คงที่ 	<ul style="list-style-type: none"> • ราคาแพง • มีผู้ผลิตจำนวนน้อย • ต้องการการบำรุงรักษาจากผู้เชี่ยวชาญ
ปั๊มทำงานในโหมดเทอร์ไบน์	<ul style="list-style-type: none"> • ราคาถูก • ดูแลรักษาได้ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> • ประสิทธิภาพต่ำกว่า • ไม่สามารถปรับทิศทางการไหลได้

จากตารางที่ 4.2 พบว่ารีแอกชันเทอร์ไบน์มีต้นทุนที่สูงกว่า อีกทั้งยังมีจำนวนผู้ผลิตน้อย จึงเลือกใช้ปั๊มทำงานในโหมดเทอร์ไบน์เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งแทนวาล์วลดความดัน ซึ่งมีต้นทุนต่ำกว่าและดูแลรักษาได้ง่าย

4.2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

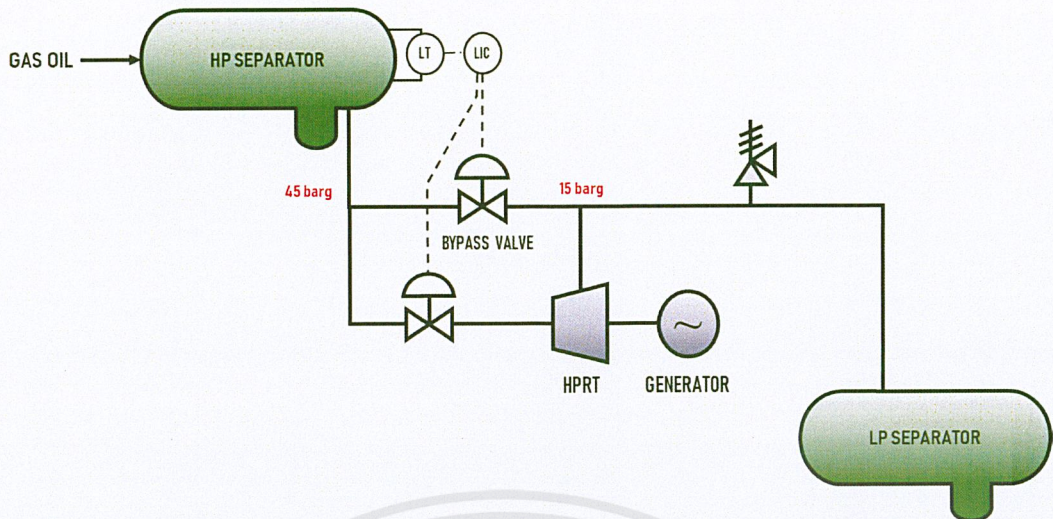
ตารางที่ 4.3 แสดงพลังงานไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์สามารถผลิตได้ในระยะเวลา 1 ปี (340 วัน) โดยคิดประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 70% (Gopalakrishnan, S. 1986) และประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มที่ 80% (อ้างอิงข้อมูลจากผู้ผลิตปั๊ม Sulzer Ltd.)

ตารางที่ 4.3 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

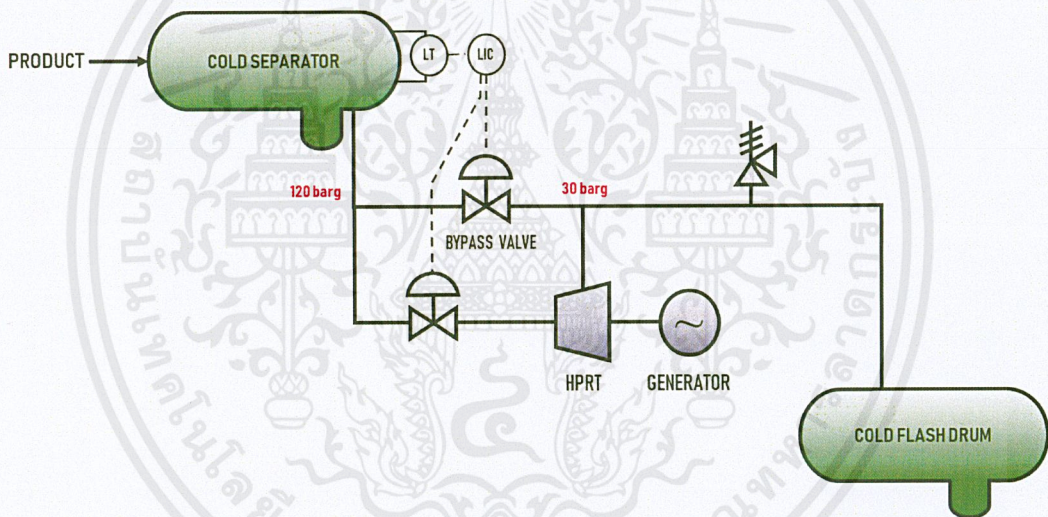
	หน่วยจำกัดกำมะถัน ในแก๊สออยล์	หน่วยแตกตัวด้วย แก๊สไฮโดรเจน	หน่วยสกรับเบอร์แก๊ส ด้วยสารละลายเอมีน
อัตราการไหล (kg/h)	143,680	182,400	37,370
ผลต่างของความดัน (bar)	29.51	90.32	113.7
ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ (%)	70	70	80
กำลังเชิงกลที่ผลิตได้ (kW/yr)	85.84	340	82.43
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (MWh/yr)	700	2,950	670
จำนวนเงิน (MTHB/yr)	2.17	9.14	2.085

4.3 อุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบเทอร์ไบน์และตำแหน่งในการติดตั้ง

การจัดเรียงเทอร์ไบน์ (HPRT) และอุปกรณ์ต่างๆ ในหน่วยปฏิบัติการอ้างอิงจาก API 610 ที่หน่วยจำกัดกำมะถันในแก๊สออยล์และหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนมีลักษณะเหมือนกัน คือพลังงานกลที่ได้จากเทอร์ไบน์ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 การจัดเรียงเทอร์ไบน์ที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์



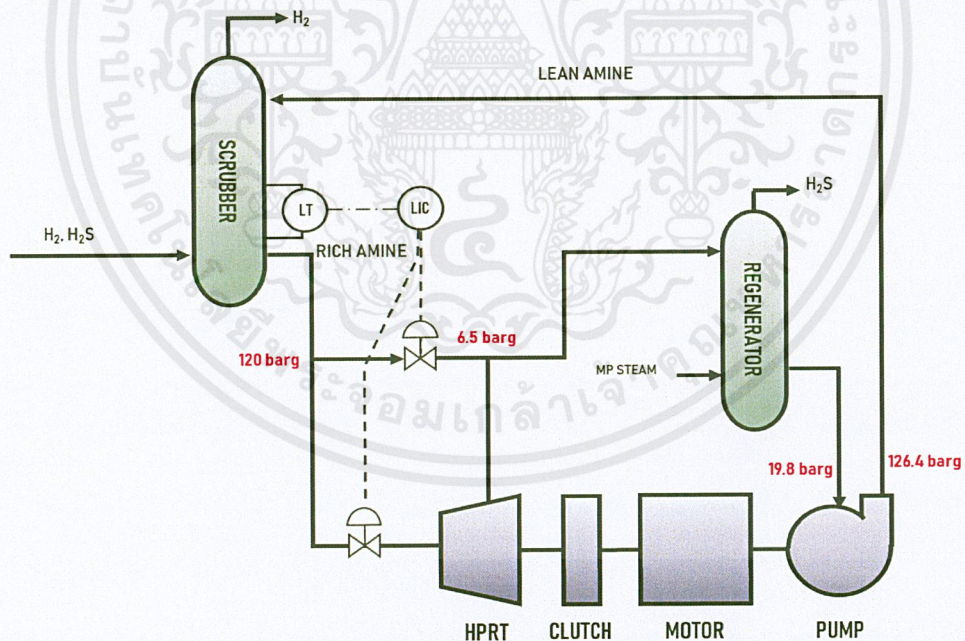
รูปที่ 4.2 การจัดเรียงเทอร์ไบน์เพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน

วาล์วควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลที่ไหลเข้า HPRT ควรติดตั้งวาล์วให้อยู่ใกล้กับทางเข้าของ HPRT มากที่สุด สำหรับของไหลที่กลายเป็นแก๊สได้ง่ายเมื่อความดันลดลง การไหลผ่านวาล์วจะช่วยให้เกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นแก๊ส ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังที่ได้จากเทอร์ไบน์

บายพาสวาล์ว (Bypass valve) ควรรองรับอัตราการไหลของกระบวนการทั้งหมดได้ ในกรณีที่เทอร์ไบน์อยู่ในช่วงซ่อมบำรุงหรือช่วงเริ่มกระบวนการผลิต ของไหลทั้งหมดจะถูกควบคุมให้ไหลผ่านบายพาสวาล์ว

วาล์วนิรภัย โดยทั่วไปวาล์วนิรภัยจะติดตั้งที่ท่อขาออกของ HPRT เพื่อป้องกันความดันย้อนกลับ ที่อาจก่อความเสียหายให้กับตัวเรือน HPRT

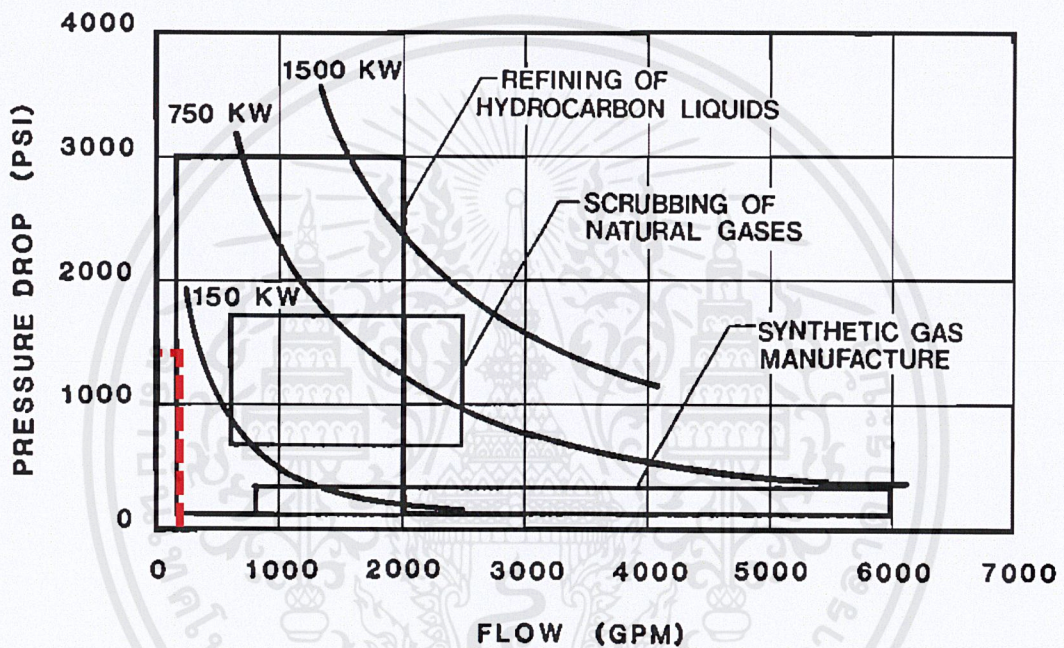
สำหรับหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน เนื่องจากในบริเวณหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน มีปั๊มหอยโข่งที่ใช้เพิ่มความดันให้กับสารละลายเอมีน ใช้กำลัง 330 kW จึงสามารถใช้พลังงานกลที่ผลิตได้จากเทอร์ไบน์ขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อส่งกำลังให้กับปั๊มหอยโข่งโดยตรง เป็นการช่วยลดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ การติดตั้งเทอร์ไบน์จึงมีความซับซ้อนกว่าหน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์และหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน เนื่องจากจำเป็นต้องมีคัตช์ที่เชื่อมต่อเพลลาหมุนเข้ากับเทอร์ไบน์และมอเตอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์ส่งกำลังให้กับเทอร์ไบน์ในช่วงเริ่มกระบวนการผลิต เนื่องจากในช่วงเริ่มกระบวนการผลิต ของไหลมีอัตราการไหลต่ำกว่าอัตราการไหลที่น้อยที่สุดที่เทอร์ไบน์สามารถทำงานได้ ทำให้ต้องหยุดการทำงานของเทอร์ไบน์โดยควบคุมการไหลให้ไหลผ่านทางวาล์วบายพาส ในช่วงนี้ มอเตอร์จะส่งกำลังให้ปั๊มสารละลายเอมีนเพลลาที่ต่อจากมอเตอร์มายังคัตช์จะถูกแยกออกจากเพลลาที่ต่อจากคัตช์ไปยังเทอร์ไบน์ ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถส่งกำลังมายังเทอร์ไบน์ในช่วงที่เทอร์ไบน์หยุดทำงานได้ โดยมีการจัดเรียงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การจัดเรียงเทอร์ไบน์เพื่อขับเคลื่อนปั๊มหอยโข่งของหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน

4.4 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน มีอัตราการไหล 37,370 kg/h (170 gpm) และผลต่างของความดัน 113.7 barg (1,670 psi) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.30 พบว่าภาวะปฏิบัติการของหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนอยู่ในบริเวณขอบอัตราการไหลต่ำสุดที่ยังสามารถใช้เทอร์ไบน์ในโรงกลั่นได้ เพราะระบบมีอัตราการไหลต่ำ อย่างไรก็ตามหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนมีความคล้ายคลึงกับตัวอย่างในงานวิจัยของ Gopalakrishnan, S. ดังนั้นจึงเลือกศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งเทอร์ไบน์ในหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนต่อไป



รูปที่ 2.30 ช่วงการใช้งานเทอร์ไบน์ในอุตสาหกรรมน้ำมัน (Gopalakrishnan S., 1986)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบภาวะปฏิบัติการของหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนและงานวิจัย (Gopalakrishnan S., 1986)

ตัวแปร	หน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน	งานวิจัยของ Gopalakrishnan S.
อัตราการไหล (m ³ /h)	32.6	227
ผลต่างของความดัน (bar)	113.7	96
ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ (%)	80	80
กำลังเชิงกลที่ผลิตได้ (kW/yr)	82.43	485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราคาอุปกรณ์จากงานวิจัยของ Gopalakrishnan S.

- HPRT คลัทช์ เกียร์ : 170,000 USD
- ค่าติดตั้งอุปกรณ์ : 250,000 USD

ประมาณราคาอุปกรณ์ของหน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน โดยเทียบราคาอุปกรณ์ต่อกำลังเชิงกลที่ผลิตได้

$$\begin{aligned}\text{ราคาอุปกรณ์} &\cong \frac{170,000 \text{ USD}}{485 \text{ kW}} \times 82.43 \text{ kW} \\ &\cong 28,890 \text{ USD} \\ &\cong 874,000 \text{ THB}\end{aligned}$$

รวมค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้ง 8,436,550 THB (ไม่ได้พิจารณาถึงอัตราเงินเฟ้อ ส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากเป็นราคาในปี ค.ศ. 1986)

4.5 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จะทำการวิเคราะห์ที่หน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนเท่านั้น เนื่องจากราคาอุปกรณ์ที่หน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออกไซด์และหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนอยู่ระหว่างการเสนอราคาจากผู้ผลิตและไม่มีแหล่งอ้างอิงสำหรับราคาอุปกรณ์และค่าติดตั้ง HPRT ที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.5.1 ต้นทุนทรัพย์สินสุทธิ

ต้นทุนทรัพย์สินสุทธิของการติดตั้ง HPRT ในหน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน ได้แก่ ราคาของอุปกรณ์และค่าติดตั้งอุปกรณ์

4.5.2 กระแสเงินสดสุทธิ

กระแสเงินสดสุทธิประเมินจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ HPRT สามารถผลิตได้ 672,650 kWh/yr คิดเป็นเงิน 2,085,500 THB/yr (ค่าไฟฟ้า 3.1 THB/kWh) โดยไม่ได้พิจารณาต้นทุนของระบบท่อ ระบบควบคุมและเครื่องมือวัด

4.5.3 อัตราผลตอบแทน

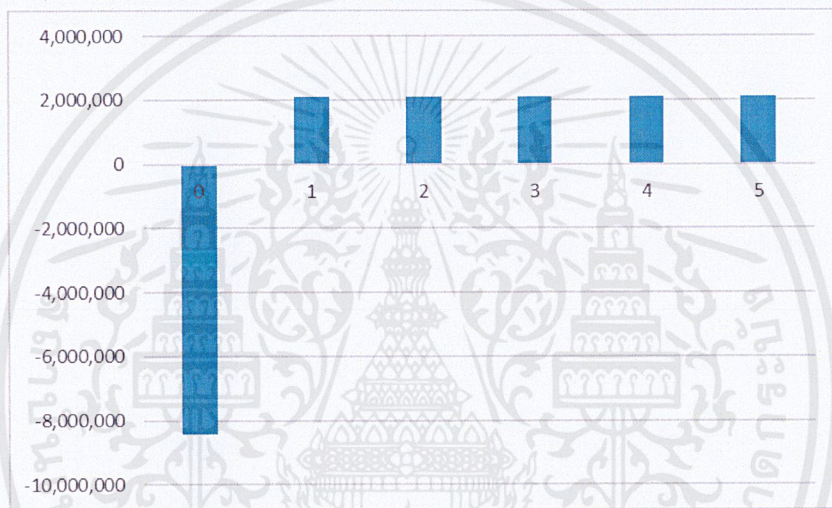
วิเคราะห์อัตราผลตอบแทนของหน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนในระยะเวลา 5 ปี เมื่ออัตราผลตอบแทนขั้นต่ำ เท่ากับ 15%

4.5.3.1 การเขียนผังกระแสเงินสด

จากข้อมูลที่ทราบแสดงดังตารางที่ 4.5 และวาดผังกระแสเงินสดได้ดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 กระแสเงินสดของเทอร์โบไนท์ในหน่วยสคริปเบอ์เกิดด้วยสารละลายเอมีน

ปีที่	กระแสเงินสด (THB)
0	-8,436,550
1	2,085,000
2	2,085,000
3	2,085,000
4	2,085,000
5	2,085,000



รูปที่ 4.4 ผังกระแสเงินสดของเทอร์โบไนท์ในหน่วยสคริปเบอ์เกิดด้วยสารละลายเอมีน

4.5.3.2 อัตราผลตอบแทน

จากกระแสเงินสดในตารางที่ 4.5 คำนวณมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของผลตอบแทนที่ได้รับโดยใช้แฟกเตอร์ $(P/A, i\%, n)$ จากสมการที่ 2.12 เนื่องจากได้รับผลตอบแทนเท่ากันในทุกปี ได้ว่า

$$-PWD = -8,436,550 \text{ THB}$$

$$A = 2,085,000 \text{ THB}$$

$$n = 5 \text{ ปี}$$

คำนวณมูลค่าปัจจุบันโดยการลองผิดลองถูก ดังนี้

สมมติครั้งที่ 1 กำหนดให้ $i = 8\%$

$$\begin{aligned}PW_{i=8\%} &= 2,085,000 \left(P/A, 8\%, 5 \right) - 8,436,550 \\ &= 2,085,000 \left(\frac{(1+0.08)^5 - 1}{0.08(1+0.08)^5} \right) - 8,436,550 \\ &= -111,750\end{aligned}$$

สมมติครั้งที่ 2 กำหนดให้ $i = 7\%$

$$\begin{aligned}PW_{i=7\%} &= 2,085,000 \left(P/A, 7\%, 5 \right) - 8,436,550 \\ &= 2,085,000 \left(\frac{(1+0.07)^5 - 1}{0.07(1+0.07)^5} \right) - 8,436,550 \\ &= 112,362\end{aligned}$$

อัตราผลตอบแทน i ที่ทำให้สมการมีค่าเท่ากับ 0 นั้นอยู่ระหว่างอัตราผลตอบแทน 7% และ 8% จึงใช้หลักการประมาณค่าในเชิงเส้น (Linear interpolation) คำนวณหา ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}i &\cong 7\% + (8\% - 7\%) \left[\frac{112,362 - 0}{112,362 - (-111,750)} \right] \\ &= 7\% + 1\%(0.5) \\ &= 7.5\%\end{aligned}$$

อัตราผลตอบแทนของโครงการนี้เป็น 7.5%

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้เทอร์ไบน์ จากการติดตั้งเทอร์ไบน์แทนวาล์วลดความดันเพื่อใช้ประโยชน์จากพลังงานของของไหลที่มีการลดความดันเปลี่ยนเป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าหรือขับเคลื่อนปั๊มเพื่อลดการใช้ไฟฟ้า สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

- ชนิดของเทอร์ไบน์ คือ ปั๊มหอยโข่งที่กลับทิศทางการไหล (PaT)
- พลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ในระยะเวลา 1 ปี (340 วัน) ในหน่วยกำจัดการกะถันในแก๊สออยล์ หน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน และหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน เท่ากับ 700 kWh, 2,950 kWh และ 670 kWh ตามลำดับ ผลตอบแทนเบื้องต้น คือ 2.17 MTHB, 9.14 MTHB และ 2.085 MTHB ตามลำดับ
- หน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนมีอัตราผลตอบแทนภายใน 7.5% โดยยังไม่ได้ประเมินต้นทุนของระบบท่อ ระบบควบคุมและเครื่องมือวัด เมื่อกำหนดอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำ 15% ในระยะเวลา 5 ปี ทำให้โครงการนี้ยังไม่เหมาะสมในการลงทุน เนื่องจากกำลังที่เทอร์ไบน์ผลิตได้ 82.43 kW มีปริมาณน้อย หากในอนาคตมีการเพิ่มกำลังการผลิตและอัตราการไหลเป็น 46,000 kg/h จะทำให้โครงการมีความเป็นไปได้ในการลงทุน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- จากงานวิจัยของ Gopalakrishnan S. เปรียบเทียบอัตราการไหลและความดันลดของหน่วยกำจัดการกะถันในแก๊สออยล์และหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนพบว่าอยู่ในช่วงที่มีความเป็นไปได้ในการใช้เทอร์ไบน์
- หน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด ผลตอบแทนเบื้องต้น 9.14 MTHB หากคิดราคาอุปกรณ์และค่าติดตั้ง 30 MTHB จะวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายในได้ 15.9% ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการลงทุนมากที่สุด
- โครงการนี้ยังไม่ได้พิจารณาความเสี่ยงที่เกิดจากความร้อนที่สะสมอันเนื่องมาจากการไหลของของไหลผ่านเทอร์ไบน์
- จากการเลือกใช้ปั๊มหอยโข่งที่กลับทิศทางการไหลเป็นอุปกรณ์ในการติดตั้งแทนวาล์วลดความดัน ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเทอร์ไบน์ ดังนั้นหากสามารถติดตั้งเทอร์ไบน์ได้ จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่หน่วยสกริปเบอ์เกิดด้วยสารละลายเอมีน อ่างอิงราคาอุปกรณ์และค่าติดตั้งจากงานวิจัยของ Gopalakrishnan S. ควรใช้ราคาเสนอขายจากผู้ผลิตเพื่อให้ได้อัตราผลตอบแทนที่ถูกต้อง



บรรณานุกรม

- บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). 2561. **2018 Electricity Consumption Report.**
- บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). 2562ก. **กลุ่มธุรกิจโรงกลั่นและการค้าน้ำมัน.**
[Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.bangchak.co.th/th/Refinery/>
- บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). 2562ข. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการกลั่นน้ำมัน.**
- ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ และศรีนคร นนทนาคร. 2559. **Control valve.** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- พฤทธิ์ สกุดช่างสังจะทัย. 2557. **เครื่องจักรกลของไหล (Turbomachines).** เชียงใหม่. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ไพบุลย์ เข้มเพื่อน. 2546. **เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Engineering Economy).** กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- สุเทพ แก้วนิย. 2554. **คู่มือปั๊ม (Pump Handbook).** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ที่อป
- อนุรักษ์ ทองสุโขวงศ์. 2554. **การตัดสินใจเพื่อการลงทุน.** [Online]. เข้าถึงได้จาก : https://home.kku.ac.th/anuton/3526301/Doc_04
- Adam, R. and Parker, J. 2011. "Reducing pressure-increasing efficiency." **Sulzer Technical Review.**: 26-29
- American Petroleum Institute. 2010. **API Standard 610 Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries.** 11th ed. Washington, DC.
- Bansal, P and Marshall, N. 2010. "Feasibility of hydraulic power recovery from waste energy in bio-gas scrubbing processes." **Applied Energy.** (87) : 1048-1053.
- Brekke, H. 2001. **Hydraulic turbines: Design, Erection and Operation.** Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- Carravetta, A., Houreh, S.D. and Ramos, H.M. 2018. **Pumps as Turbined Fundamentals and Applications.** Switzerland : Springer International.
- Cengel, Y.A. and Cimbala, J.M. 2017. **Fluid Mechanics Fundamentals and Applications.** 4th ed. New York : McGraw-Hill Education.
- Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A. 2008. "Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds." **Experimental Thermal and Fluid Science.** (32) : 800–807.

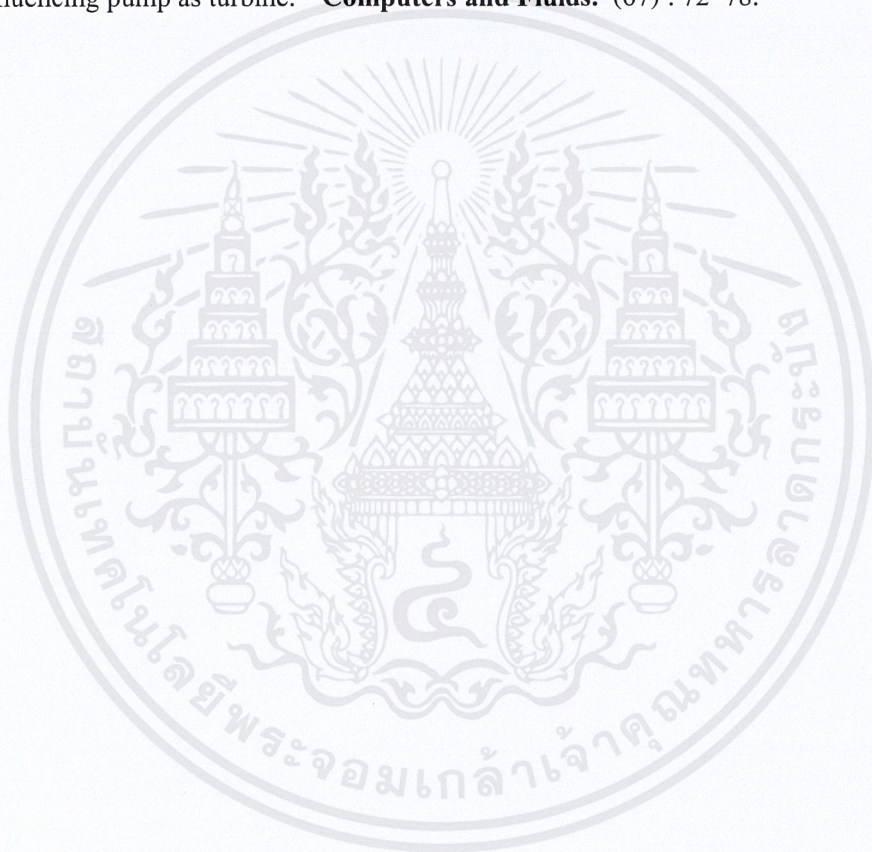
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Emerson Electric Co. 2005. **Control Valve Handbook**. 4th ed. USA : Fisher Controls International
- Essom Company Limited. 2019 “Mini Pelton Turbine.” **Instruction Manual**. Bangkok.
- Fasi, U. R. 2016. **Francis Turbine–its Components, Working and Application**. [Online]. Available : <https://theconstructor.org/practical-guide/francis-turbines-components-application/2900/>
- Giardinella, S., Chung, K. and Avila, M. 2017. **Improve energy efficiency using hydraulic power recovery turbines**. [Online]. Available : <https://www.chemengonline.com/improve-energy-efficiency-using-hydraulic-power-recovery-turbines/>
- Gopalakrishnan, S. 1986. **Power Recovery Turbines for The Process Industry**. Turbomachinery Laboratories, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University.
- Gulich, J.F. 2010. **Centrifugal Pumps**. 2nd ed. New York : Springer International.
- Jain, S.V. and Patel, R.N. 2014. Investigations on pump running in turbine mode: a review of the state-of-the-art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. (30) : 841–868.
- Kakac, S., Liu, H. and Pramuanjaroenkit, A. 2013. **Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design**. 3rd ed. Taylor & Francis Group.
- Praveen, K. 2017. **Valve trim design using Control Valve Performer**. [Online]. Available : <https://www.simulationhub.com/blog/valve-trim-design-using-control-valve-performer>
- Rossi, M., Righetti, M. and Renzi, M. 2016. “Pump-as-Turbine for energy recovery applications: the case study of an aqueduct.” **Energy Procedia**. (101) : 1207-1214.
- Shah, R.K. and Sekulic, D.P. 2003. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. Canada. John Wiley & Sons.
- Singh, P. 2005. “Optimization of internal hydraulics and of system design for pumps as turbines with field implementation and evaluation.” Ph.D. Dissertation. University of Karlsruhe.
- Sulzer Ltd. **Hydraulic Power Recovery Turbines**. [Slide].
- Teuteberg, B.H. 2010. “Design of a Pump-As-Turbine Microhydro System for an Abalone Farm.” Master's Thesis. Stellenbosch University.
- Thulukkanam, K. et.al. 2013. **Heat Exchanger Design Handbook**. 2nd ed. New York: CRC Press.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Towler, G. and Sinnott, R. 2012. **Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design**. 2nd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- Venkatachalapathy, G. 2016. “Performance modeling of Power Recovery Turbines with combined 1D-CFD methods.” Master of Science. Delft University of Technology.
- White, F.M. 2016. **Fluid Mechanics**. 8th ed. New York : McGraw-Hill Education.
- Yang, S.S., Kong, F.Y., Jiang, M.W., and Qu, X.Y. 2012. “Effects of impeller trimming influencing pump as turbine.” **Computers and Fluids**. (67) : 72–78.





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
เอกสารข้อมูลสมบัติของสาร

ก.1 หน่วยก่าจัดก่ามะถันในแก๊สออยล์

สำหรับหน่วยก่าจัดก่ามะถันในแก๊สออยล์ เนื่องจากทราบองค์ประกอบ ภาวะปฏิบัติการ และสมบัติของสารของสายด้านออกจากวาล์วเท่านั้น จึงใช้โปรแกรม Aspen HYSYS Version10 ช่วยหาภาวะปฏิบัติการของสารด้านขาเข้าวาล์ว

ก.1.1 องค์ประกอบของแก๊สออยล์

โดยองค์ประกอบที่ทราบแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นสารบริสุทธิ์ตามตารางที่ ก.1 และส่วนที่แสดงเป็นอนุกรมวิธานจัดตั้งตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบบริสุทธิ์ของแก๊สออยล์

สาร	สูตรโครงสร้าง
Hydrogen	H ₂
Hydrogen sulfide	H ₂ S
Ammonia	NH ₃
Methane	CH ₄
Ethane	C ₂ H ₆
Propane	C ₃ H ₈
Butane	C ₄ H ₁₀
Pentane	C ₅ H ₁₂
Water	H ₂ O

ตารางที่ ก.2 อุณหภูมิจุดตัด (Cut point) ของแก๊สออยล์

อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละโดยน้ำหนัก
80 - 150	1.702
150 - 178	4.623
178 - 200	4.666
200 - 234	9.455
234 - 262	9.621
262 - 302	19.555
302 - 338	20.052
338 - 409	30.957

ก.1.2 กำหนดสมการสถานะที่ใช้ในการคำนวณสมบัติของสาร

การเลือกสมการสถานะเป็นสิ่งสำคัญในการจำลองกระบวนการผลิตอย่างมาก เนื่องจากความถูกต้องของการคำนวณขึ้นอยู่กับวิธีการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารในกระบวนการนั้น โดยการศึกษาในหน่วยจำกัดกำเนิดในแก๊สออยล์ เลือกใช้สมการสถานะของ Peng-Robinson

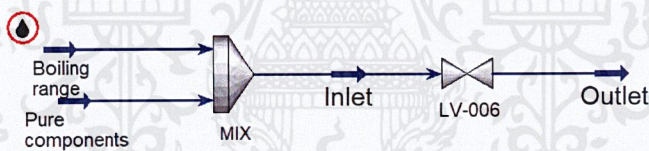
ก.1.3 กำหนดกระแสการไหล

การกำหนดกระแสการไหล ต้องระบุองค์ประกอบ อัตราการไหล อุณหภูมิ และความดัน การระบุองค์ประกอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบบริสุทธิ์ (กระแส Pure components) และส่วนที่เป็นอุณหภูมิจุดตัด โดยใช้ฟังก์ชัน Petroleum assay ที่ใช้ในการกำหนดสมบัติของน้ำมันจากข้อมูลอุณหภูมิจุดตัดที่ทราบ (กระแส Petroleum assay) โดยใช้ช่วงอุณหภูมิและร้อยละโดยมวลในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

Results Summary	Pure Component	Distillation	Property Table	Message				
	Whole Crude	Cut 1	Cut 2	Cut 3	Cut 4	Cut 5	Cut 6	
Initial Temperature: (C)	IBP	IBP	80.0000	150.0000	178.0000	200.0000	234.0000	
Final Temperature: (C)	FBP	80.0000	150.0000	178.0000	200.0000	234.0000	262.0000	
CutYieldByWt (%)	100.00	0.00	1.05	4.61	4.69	9.47	9.67	
StdLiquidDensity (kg/m3)	774.7753	668.5247	714.0596	729.1396	740.0579	752.6498	764.1118	
SulfurByWt (%)								
KinematicViscosity (cSt)...	2.930	0.430	0.726	0.932	1.153	1.536	2.084	
ParaffinsByVol (%)	66.794	68.994	72.419	73.278	73.444	73.233	72.027	
NaphthenesByVol (%)	33.206	31.006	27.581	26.722	26.556	26.767	27.973	
OlefinsByVol (%)								
AromByVol (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
PourPoint (C)	-5.410	-135.316	-97.233	-82.232	-70.339	-54.460	-39.015	
FreezePoint (C)	14.556	-108.954	-64.160	-47.016	-33.831	-17.505	-1.777	

รูปที่ ก.1 การกำหนดองค์ประกอบของแก๊สออยล์ในฟังก์ชัน Petroleum assay

จากนั้นนำกระแสที่ได้ทั้ง 2 ส่วนมาผสมกัน จะได้กระแส Inlet ดังรูปที่ ก.2 กำหนดความดันลดตกคร่อมวาล์วตามค่าออกแบบ 29.51 bar และกำหนดภาวะปฏิบัติการของสารด้านขาออกจากวาล์ว (กระแส Outlet) ที่อุณหภูมิ 49.7 °C ความดัน 14.99 barg เพื่อให้โปรแกรมคำนวณสมบัติของสารด้านขาเข้าวาล์วได้ผลดังแสดงในตารางที่ ก.3



รูปที่ ก.2 แผนภาพการจำลองของโปรแกรม Aspen HYSYS Version10

ตารางที่ ก.3 สมบัติของสารในหน่วยกำจัดกำมะถันในแก๊สออยล์

สมบัติของสาร	ขาเข้า	ขาออก
ความดัน (barg)	45	14.99
อุณหภูมิ (°C)	45	49.7
สถานะแก๊ส		
อัตราการไหล (kg/h)	34.31	458.1
ร้อยละโดยมวล (%)	0.024	0.32
ความหนาแน่น (kg/m ³)	13.43	7.481
มวลโมเลกุล (g/mol)	7.73	12.42
สถานะของเหลว		
อัตราการไหล (kg/h)	143,640	143,220
ร้อยละโดยมวล (%)	99.97	99.68
ความหนาแน่น (kg/m ³)	816.4	813.5
ความหนืด (mPas)	2.321	2.258

ก.2 หน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน

สำหรับหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน ทราบสมบัติของสารทั้งด้านขาเข้าและขาออกจาก วาล์วจากแผนภาพการไหลของกระบวนการ (Process flow diagram) แสดงดังตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 สมบัติของสารในหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน

สมบัติของสาร	ขาเข้า	ขาออก
ความดัน (MPa)	12.17	3.315
อุณหภูมิ (°C)	54	60
สถานะแก๊ส		
อัตราการไหล (kg/h)	-	329
ร้อยละโดยมวล (%)	-	0.18
ความหนาแน่น (kg/m ³)	-	5.98
มวลโมเลกุล (g/mol)	-	4.45
สถานะของเหลว		
อัตราการไหล (kg/h)	182,450	182,115
ร้อยละโดยมวล (%)	100	99.82
ความหนาแน่น (kg/m ³)	753.7	751.5
ความหนืด (mPas)	0.35	0.7

ก.3 หน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน

สำหรับหน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน ทราบสมบัติของสารทั้งด้านขาเข้าและขาออกจากวาล์วจากแผนภาพการไหลของกระบวนการ (Process flow diagram) แสดงดังตารางที่ ก.5

ตารางที่ ก.5 สมบัติของสารในหน่วยสกรับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน

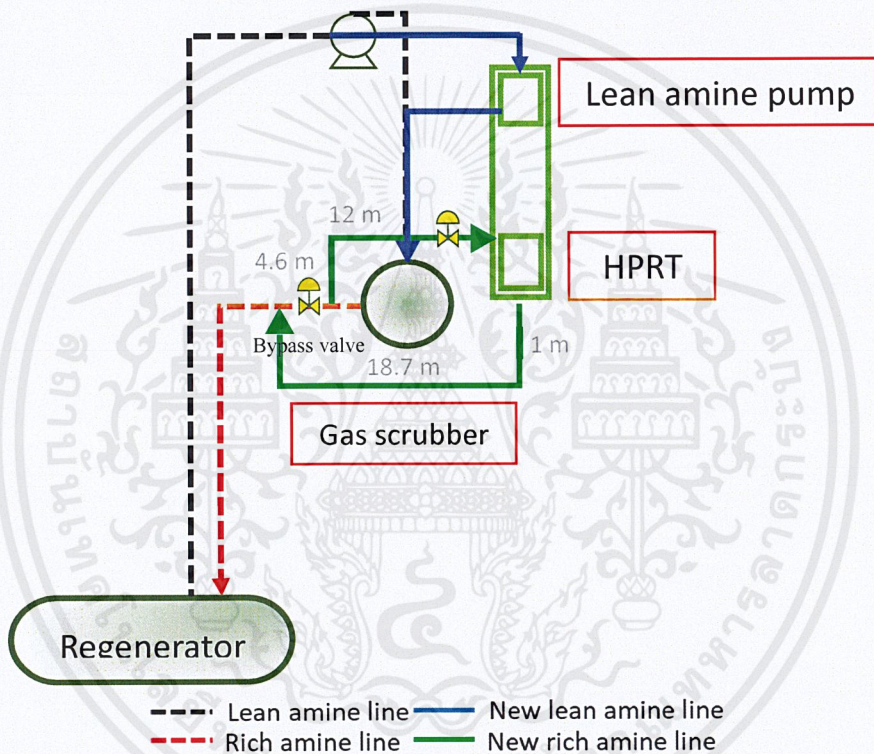
สมบัติของสาร	ขาเข้า	ขาออก
ความดัน (MPa)	12.13	0.7513
อุณหภูมิ (°C)	40	48
สถานะของเหลว		
อัตราการไหล (kg/h)	37,370	37,370
ความหนาแน่น (kg/m ³)	973.7	965.4
ความหนืด (mPas)	0.94	0.80

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

ข.1 การติดตั้งเทอร์ไบน์ในหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน

การติดตั้งเทอร์ไบน์ ขนาด กว้าง 2.5 m. ยาว 8 m. (อ้างอิงขนาดจากผู้ผลิตปั๊ม Sulzer Ltd.) ในหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีนและระบบท่อที่ติดตั้งใหม่พร้อมความยาวท่อแสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 การติดตั้งเทอร์ไบน์ในหน่วยสครับเบอร์แก๊สด้วยสารละลายเอมีน

ในการเลือกตำแหน่งติดตั้ง HPRT จะเลือกตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับหอสครับเบอร์มากที่สุด เพื่อลดความยาวของท่อที่ก่อให้เกิดความสูญเสียในระบบท่อ ส่งผลให้ความดันของของไหลที่เข้าเทอร์ไบน์ลดลง และเพื่อให้ความดันของของไหลที่ไปรวมกับท่อบายพาสมีค่าเท่าเดิม ความดันลดตกคร่อมเทอร์ไบน์ จะมีค่าต่ำกว่าความดันลดตกคร่อมวาล์วเดิม ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าลดลง ดังนั้นจึงต้องติดตั้งเทอร์ไบน์ให้ใกล้กับหน่วยปฏิบัติการที่สุด

ข.2 ความสูญเสียในระบบท่อ

คำนวณความสูญเสียในระบบท่อของ Rich amine หลังจากติดตั้งเทอร์ไบน์ โดยไม่พิจารณาความสูญเสียที่เกิดจากวาล์วหรือข้อต่อ

ขนาดท่อที่ติดตั้งและชนิดท่อ

เลือกใช้ขนาดท่อและชนิดท่อเหมือนท่อเดิม 4 in. SCH 160 เหล็กกล้าคาร์บอน เพื่อให้สามารถรองรับอัตราการไหลและสมบัติของของไหลได้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 114.3 mm

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 87.3 mm

ความยาวท่อ (ค่าปรับแก้ความยาว $\times 2$ (BCP)) 37.3 m

ความเร็วของของไหล

$$\begin{aligned}v &= \frac{Q}{A} \\&= \frac{37,370 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{973.7 \text{ kg}} \times 0.85}{\pi \frac{0.0873^2}{4} \text{ m}^2} \\&= 1.51 \text{ m/s}\end{aligned}$$

หาค่าเรย์โนลด์ จากสมการที่ 2.7

$$\begin{aligned}\text{Re} &= \frac{\rho v D}{\mu} \\&= \frac{973.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.51 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.0873 \text{ m}}{0.00079 \text{ Pa} \cdot \text{s}} \\&= 162,500\end{aligned}$$

ค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (Relative roughness, $\frac{\mathcal{E}}{d}$)

ค่าความขรุขระของท่อเหล็กกล้าคาร์บอน (\mathcal{E}) 45 μm (Jacques Chaurette, 2003)

$$\begin{aligned}\frac{\mathcal{E}}{d} &= \frac{45 \times 10^{-6} \text{ m}}{0.0873 \text{ m}} \\&= 0.0005\end{aligned}$$

จากรูปที่ 2.20 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ (Friction factor) เท่ากับ 0.019
จากสมการที่ 2.6

$$\begin{aligned}\Delta P &= \rho f \frac{L V^2}{D} \\ &= 973.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.019 \times \frac{37.3 \text{ m}}{0.0873 \text{ m}} \times \frac{1.51^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2} \\ &= 9,010 \text{ Pa} \\ &= 0.09 \text{ bar}\end{aligned}$$

ข.3 กำลังของของไหล

ความดันลดที่เกิดจากวาล์วลดความดัน เท่ากับ 113.8 bar เนื่องจากมีความดันลดที่เกิดจากการสูญเสียในระบบท่อ ดังนั้นความแตกต่างของความดันที่เทอร์โมไบนีมีค่าเท่ากับ 113.7 bar

$$\begin{aligned}W_{hyd} &= \frac{Q \Delta P}{3,600,000} \\ &= \frac{\left(37,370 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1}{973.7} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times 0.85 \right) \left(113.7 \text{ bar} \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}} \right)}{3,600,000} \\ &= 103 \text{ kW}\end{aligned} \tag{3.2}$$

ข.4 พลังงานไฟฟ้าที่กังหันสามารถผลิตได้

$$\begin{aligned}E_{exp} &= \left(W_{hyd} \times \eta_{HPRT} \times \eta_{gen} \right) A \\ &= 103 \times 0.8 \times 8,160 \\ &= 672,400 \text{ kWh}\end{aligned} \tag{3.3}$$

ข.5 ค่าไฟฟ้า

$$\begin{aligned}\text{ค่าไฟฟ้า} &= E_{exp} \times \text{ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย} \\ &= 672,400 \times 3.1 \\ &= 2,085,500 \text{ THB}\end{aligned} \tag{3.4}$$

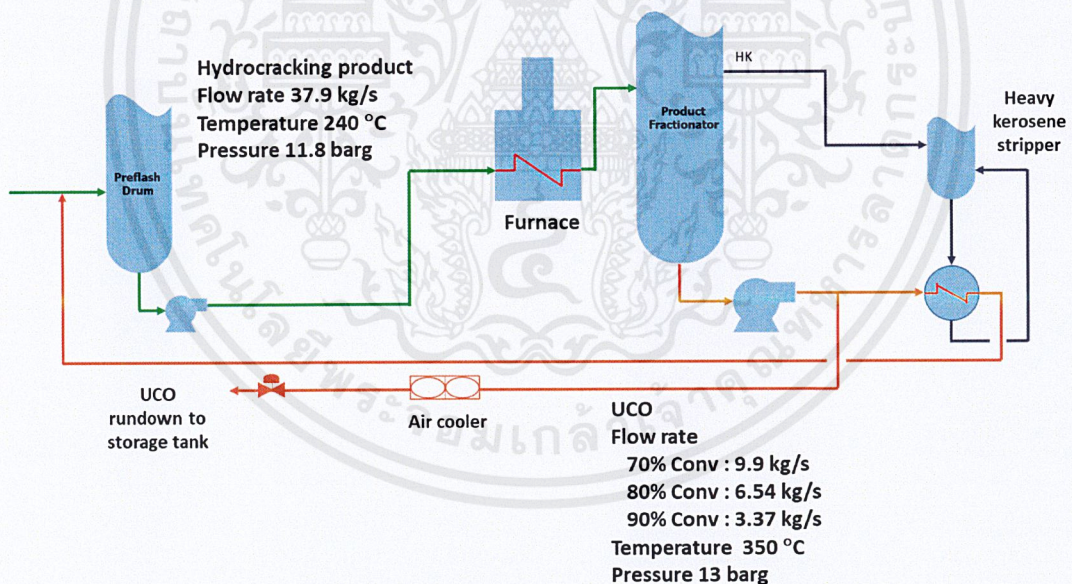
ภาคผนวก ค

งานที่ได้รับมอบหมายเพิ่มเติม

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับถ่ายโอนความร้อนจาก Unconverted oil ให้นำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน เพื่อลดการใช้แก๊สเชื้อเพลิง

ค.1 ที่มาของโครงการ

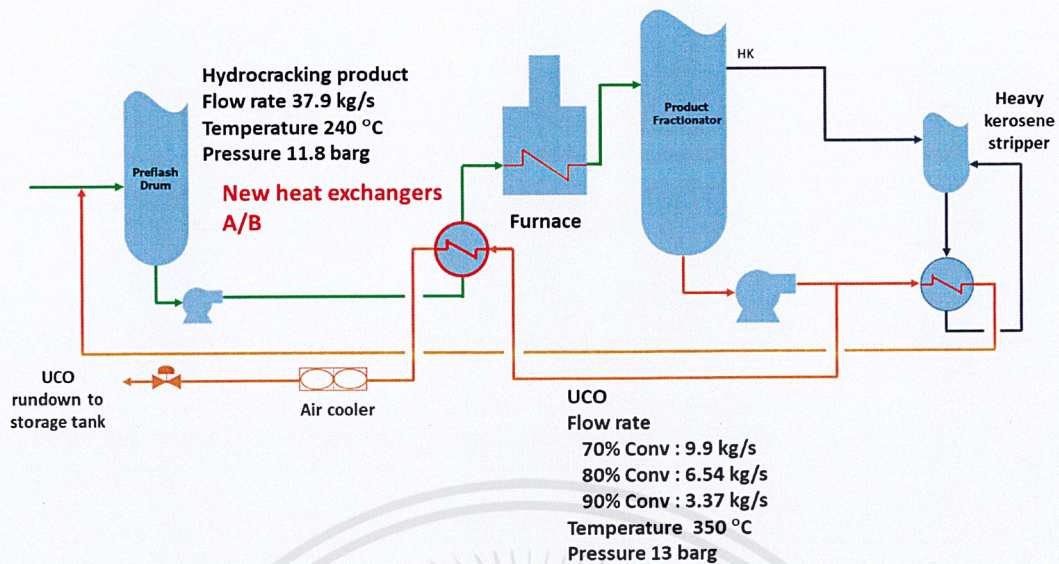
น้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนจากหน่วยกลั่นที่ 4 ออกจากถังแยก (Preflash drum) ที่อุณหภูมิ 240 °C หลังจากนั้นเข้าเตาให้ความร้อน (Furnace) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน ก่อนเข้าสู่หอแยกส่วนผลิตภัณฑ์ (Product fractionator) เพื่อแยกออกเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ น้ำมันที่ไม่แตกตัว (Unconverted oil: UCO) จะออกที่ด้านล่างหอแยกส่วนผลิตภัณฑ์ มีอุณหภูมิ 350 °C และถูกลดอุณหภูมิด้วยเครื่องทำความเย็น โดยใช้อากาศ (Air cooler) เหลือประมาณ 60 °C ก่อนเข้าสู่ถังเก็บ แสดงดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 กระบวนการผลิตอย่างง่ายของหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนก่อนติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

โรงงานต้องการลดการใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่เตาให้ความร้อน ด้วยการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อถ่ายโอนความร้อนจาก UCO ให้กับน้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนก่อนเข้าเตาให้ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ ค.2 และแสดงภาวะปฏิบัติการของทั้ง 2 กระแสดังตารางที่ ค.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 กระบวนการผลิตอย่างง่ายของหน่วยแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน
หลังติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 เครื่อง

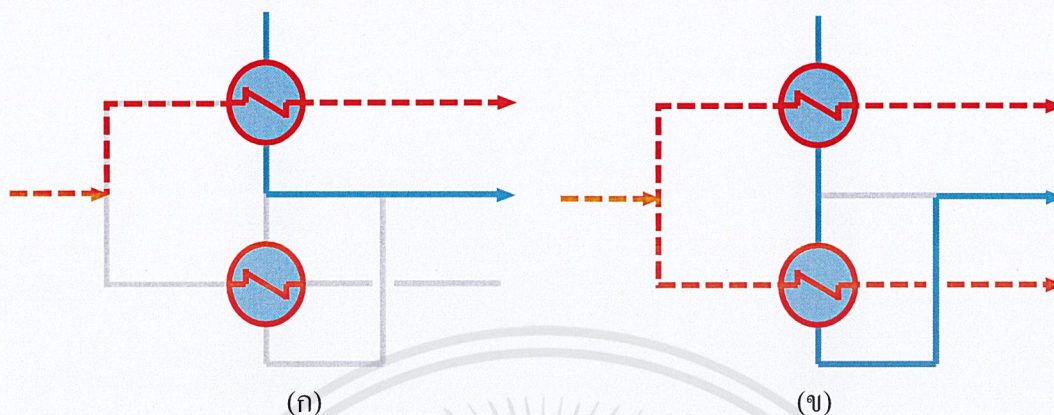
ตารางที่ ก.1 สมบัติทางกายภาพของของไหล

	น้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน	UCO
อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)		
70% Conv.	37.9	9.9
80% Conv.	37.9	6.54
90% Conv.	37.9	3.37
อุณหภูมิเข้า (°C)	240	350
ความดัน (barg)	11.4	12.6
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg°C)	2,801	3,147
ความหนาแน่น (kg/m ³)	655.1	648.6
ความหนืด (Pas)	0.0003	0.00026

ก.2 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

โครงการนี้การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามมาตรฐาน TEMA และจากตาราง ก.1 พบว่าอัตราการไหลของ UCO ในกรณี 70% Conv. สูงกว่า 90% Conv. ค่อนข้างมาก จึงติดตั้งเครื่อง

แลกเปลี่ยนความร้อน 2 เครื่อง เพื่อให้ความเร็วของของไหลในท่ออยู่ระหว่าง 1-2.4 m/s เป็นการป้องกันการตกตะกอนและการสึกกร่อนในท่อ โดยมีรูปแบบการไหลแสดงดังรูปที่ ค.3



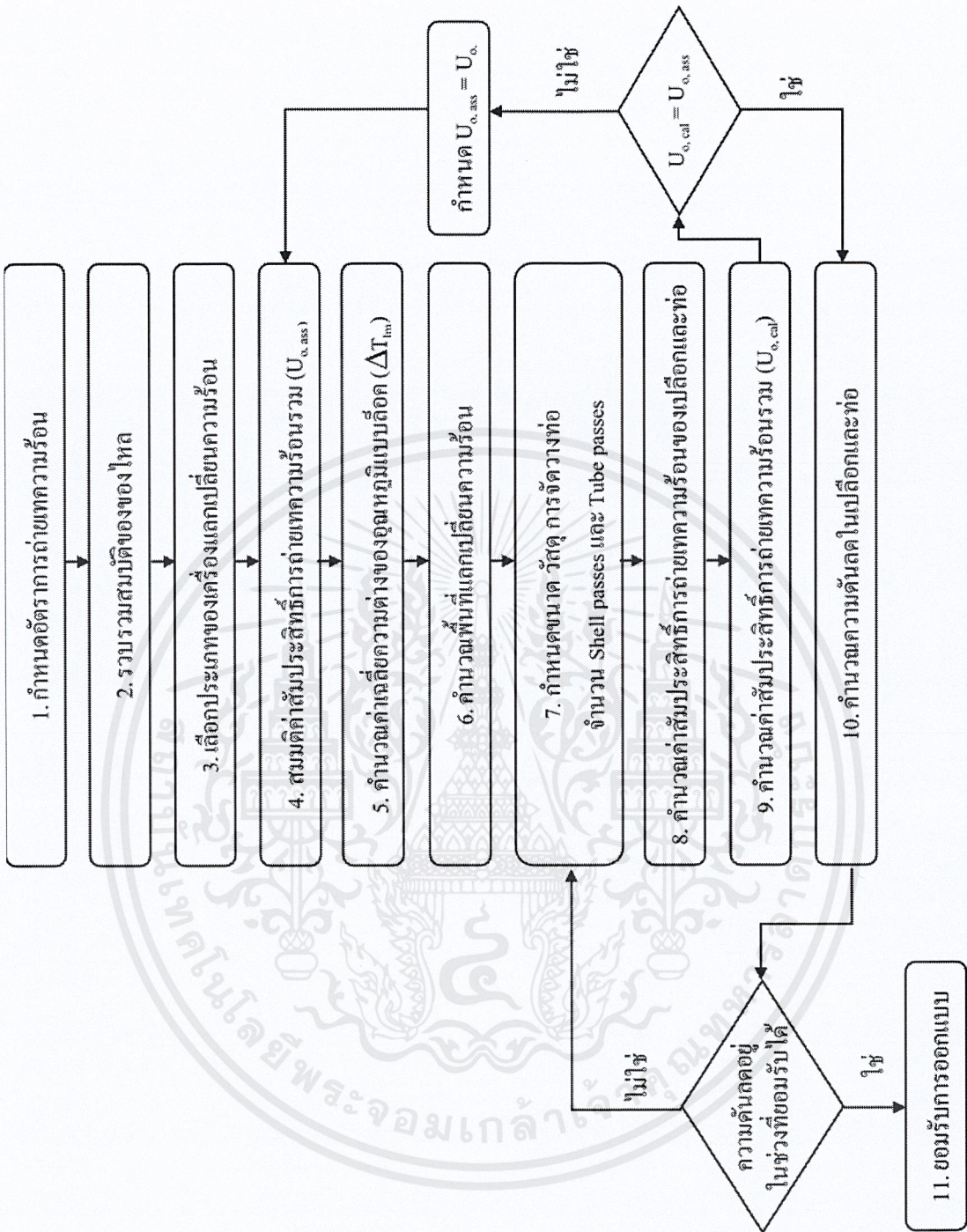
--- UCO
 — Hydrocracking product

รูปที่ ค.3 รูปแบบการไหลของ UCO และน้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน

(ก) กรณี 80% Conv. และ 90% Conv. (ข) กรณี 70% Conv.

ในกรณี 80% Conv. และ 90% Conv. UCO และน้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนจะไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพียงเครื่องเดียว แต่ในกรณี 70% Conv. UCO จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กระแสเท่ากันและไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 เครื่อง ส่วนน้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจนจะไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องแรกและเข้าสู่เครื่องที่สองตามลำดับ

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ ค.4



รูปที่ ค.4 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Towler, G. and Sinnott, R. 2012)

แสดงตัวอย่างการคำนวณในกรณี 90% Conv.

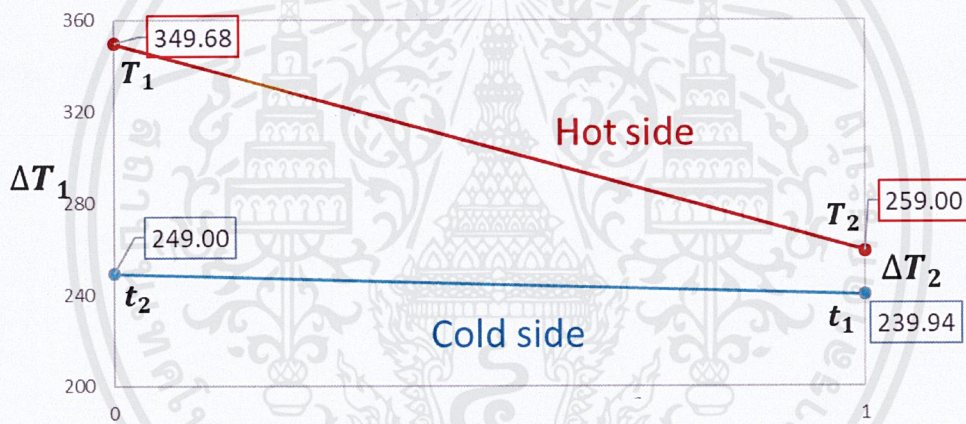
ค.2.1 กำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ ค.1

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad (ค.1)$$

จากภาวะปฏิบัติการดังตาราง ค.1 ไม่ทราบอุณหภูมิขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จึงกำหนดอุณหภูมิแอมโปรซที่ 10°C ($T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{in}}$) ดังรูปที่ ค.5 โดยกำหนดอุณหภูมิขาออกของ UCO และใช้สมการที่ ค.2 คำนวณอุณหภูมิขาออกของน้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน

$$Q_{\text{cold}} = Q_{\text{hot}} = \dot{m}_{\text{hot}} C_{p,\text{hot}} \Delta T_{\text{hot}} \quad (ค.2)$$



รูปที่ ค.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ ค.1 ได้

$$\begin{aligned} Q_{\text{hot}} &= \dot{m}_{\text{hot}} C_{p,\text{hot}} \Delta T_{\text{hot}} \\ &= 3.37 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3,147 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (350 - 259^\circ\text{C}) \\ &= 961,450 \text{ W} \end{aligned}$$

คำนวณอุณหภูมิขาออกของกระแสเย็นสมการที่ ค.2 ได้

$$\begin{aligned} Q_{\text{cold}} &= Q_{\text{hot}} = \dot{m}_{\text{hot}} C_{p,\text{hot}} \Delta T_{\text{hot}} \\ &= 961,450 \text{ W} = 37.9 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2,801 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (T_{c,\text{out}} - 240^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

$$T_{c,\text{out}} = 249^\circ\text{C}$$

ค.2.2 รวบรวมสมบัติของของไหล

หาสมบัติทางกายภาพของน้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน และ UCO ได้แก่ อัตราการไหล อุณหภูมิ ความดัน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่นและความหนืด แสดงดังตารางที่ ค.1

ค.2.3 เลือกประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เลือกประเภทเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 3 ประเภท ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double pipe) แบบเปลือกและท่อ (Shell and tube) และแบบเพลท (Plate type) แสดงดังตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละประเภท (Shah, R.K. and Sekulic, D.P. 2003 ; Thulukkanam, K. 2013)

ประเภท	ข้อดี	ข้อจำกัด
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	<ul style="list-style-type: none">• ใช้ในกระบวนการที่มีอุณหภูมิและความดันสูง	<ul style="list-style-type: none">• มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ (50 m^2)
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ	<ul style="list-style-type: none">• ดูแลรักษาได้ง่าย• สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ($1,100 \text{ }^\circ\text{C}$)	<ul style="list-style-type: none">• ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลท	<ul style="list-style-type: none">• อุณหภูมิแอปโพรชต่ำ ($1 \text{ }^\circ\text{C}$)• มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง	<ul style="list-style-type: none">• ใช้งานในกระบวนการที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า $160 \text{ }^\circ\text{C}$ เนื่องจากข้อจำกัดของวัสดุ

จาดตารางที่ ค.2 พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลทมีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้ จึงเลือกใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ซึ่งสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้

ค.2.4 สมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($U_{o, \text{ass}}$)

สมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม $U_{o, \text{ass}} = 350 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ โดยอ้างอิงจากค่าประมาณในรูปที่ ค.6 ซึ่งทั้งกระแสนอนและกระแสนอนมีความหนืดอยู่ในช่วง $0.1\text{-}1 \text{ mPas}$ จัดเป็นกลุ่มน้ำมันเบา (Light oil)

ตารางที่ ค.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Towler, G. and Sinnott, R. 2012)

Shell and Tube Exchangers		
Hot Fluid	Cold Fluid	U (W/m ² °C)
<i>Heat exchangers</i>		
Water	Water	800–1500
Organic solvents	Organic solvents	100–300
Light oils	Light oils	100–400
Heavy oils	Heavy oils	50–300
Gases	Gases	10–50

ค.2.5 คำนวณค่าเฉลี่ยความต่างของอุณหภูมิแบบล็อก (ΔT_{lm})

ค่าเฉลี่ยความต่างของอุณหภูมิแบบล็อกคำนวณได้จากสมการที่ ค.3

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (\text{ค.3})$$

จากรูปที่ ค.5 $\Delta T_1 = 100^\circ\text{C}$ และ $\Delta T_2 = 19^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \Delta T_{lm} &= \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \\ &= \frac{100 - 19}{\ln(100 / 19)} \\ &= 49^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ค.2.6 คำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน

พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนคำนวณจากสมการที่ ค.4

$$Q = UAF\Delta T_{lm} \quad (\text{ค.4})$$

$$F = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \ln \left[\frac{(1 - S)}{(1 - RS)} \right]}{(R - 1) \ln \left[\frac{2 - S \left[R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)} \right]}{2 - S \left[R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)} \right]} \right]} \quad (\text{ค.5})$$

$$\text{เมื่อ } R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)}$$

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)}$$

$$R = \frac{(350 - 259)}{(249 - 240)} = 10.01$$

$$S = \frac{(249 - 240)}{(350 - 240)} = 0.08$$

$$F = \frac{\sqrt{(10.01^2 + 1)} \ln \left[\frac{(1 - 0.08)}{(1 - (10.01)(0.08))} \right]}{(10.01 - 1) \ln \left[\frac{2 - 0.08 \left[10.01 + 1 - \sqrt{(10.01^2 + 1)} \right]}{2 - 0.08 \left[10.01 + 1 + \sqrt{(10.01^2 + 1)} \right]} \right]}$$

$$= 0.93$$

หาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการที่ ค.4

$$961,450 \text{ W} = \left(350 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \right) A (0.93) (49 \text{ C})$$

$$A = 60.22 \text{ m}^2$$

ค.2.7 กำหนดขนาด วัสดุ การจัดวางท่อ จำนวน Shell passes และ Tube passes กำหนด

- ชนิดของของไหลในเปลือก: น้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน
- ชนิดของของไหลในท่อ: UCO
- ใช้ท่อเหล็กกล้าคาร์บอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $\frac{3}{4}$ in (19 mm.) ความหนาของท่อ B.W.G. 14 (2.108 mm.) และความยาวท่อ 12 ft (3.65 m.)
- จัดวางท่อแบบ Square ระยะห่างระหว่างท่อ (Tube pinch: P_t) 1.25 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ เท่ากับ 23.8 mm.
- จำนวน Shell pass เท่ากับ 1 และจำนวน Tube passes (N_p) เท่ากับ 8
- ชนิดของแผ่นกั้น คือ Single segmental ขนาดตัดของแผ่นกั้น 20% ระยะห่างของแผ่นกั้น 0.55 m.

หาจำนวนท่อที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้จากสมการที่ ค.6

$$\text{จำนวนท่อ} = \frac{\text{พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน}}{\text{พื้นที่ผิวของ 1 ท่อ}} \quad (\text{ค.6})$$

$$\text{จำนวนท่อ} = \frac{60.22 \text{ m}^2}{\pi (19 / 1000 \text{ m}) (3.65 \text{ m})}$$

$$= 282 \text{ ท่อ}$$

จะได้จำนวนท่อต่อ 1 tube pass เท่ากับ 35 ท่อ

คำนวณความเร็วของของไหลในท่อ

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho \times \text{cross-sectional area per tube pass}}$$

$$= \frac{3.37 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{648.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (\pi \times (14.83 / 1000)^2 / 4 \times 35 \text{m}^2)}$$

$$= 0.86 \text{ m/s}$$

ตารางที่ ค.4 ความเร็วของของไหลในท่อในแต่ละกรณี

Conversion (%)	ความเร็วของของไหลในท่อ (m/s)
70	1.26
80	1.67
90	0.86

หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเปลือกได้ 23¼ in โดยเทียบจากตารางที่ ค.5

ตารางที่ ค.5 เทียบขนาดของเปลือก (Kakak, S et.al. 2012)

Tube-Shell Layouts (Tube Counts)

Shell ID (in.)	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
<i>3/4-in. OD tubes on 1-in. square pitch</i>					
8	32	26	20	20	
10	52	52	40	36	
12	81	76	68	68	60
13 ¼	97	90	82	76	70
15 ¼	137	124	116	108	108
17 ¼	177	166	158	150	142
19 ¼	224	220	204	192	188
<i>3/4-in. OD tubes on 1-in. square pitch</i>					
21 ¼	277	270	246	240	234
23 ¼	341	324	308	302	292
25	413	394	370	356	346
27	481	460	432	420	408
29	553	526	480	468	456
31	657	640	600	580	560
33	749	718	688	676	648
35	845	824	780	766	748
37	934	914	886	866	838
39	1049	1024	982	968	948

282 tubes

ค.2.8 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเปลือกและท่อ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเปลือกและท่อคำนวณได้จากสมการ ค.7 และ ค.8 ตามลำดับ

$$\frac{h_t d_i}{k_{f,t}} = j_h \text{RePr}^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-0.14} \quad (\text{ค.7})$$

$$\frac{h_s d_e}{k_{f,s}} = j_h \text{RePr}^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-0.14} \quad (\text{ค.8})$$

เมื่อ $\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{G_s d_e}{\mu}$

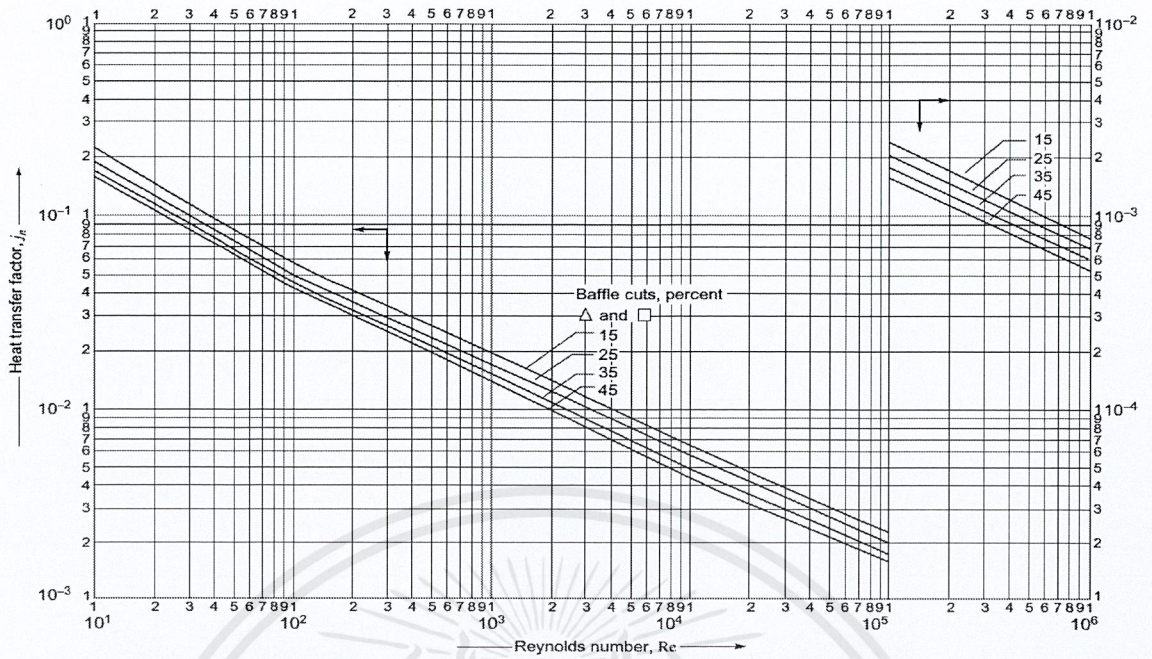
$G_s = \frac{\dot{m}}{A_s}$ (ความเร็วเชิงมวลในเปลือก)

$A_s = \frac{(P_t - d_o) D_s l_b}{P_t}$

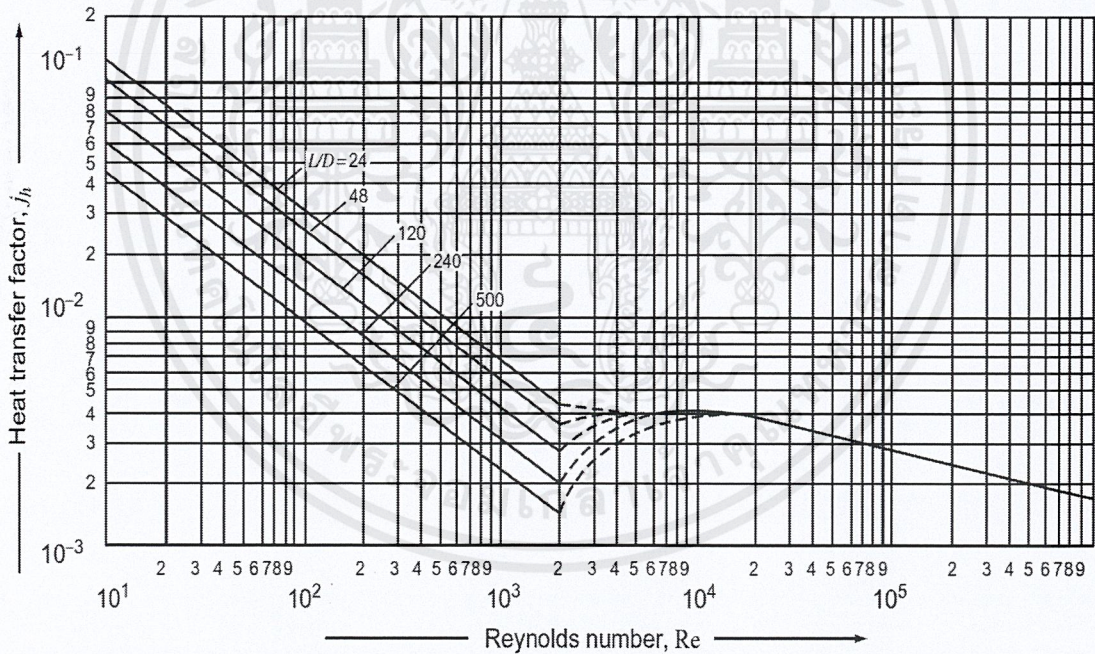
$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k_f}$

$d_c = \frac{4 \left(P_t^2 - \frac{\pi d_o^2}{4} \right)}{\pi d_o}$

หาค่า j_h (Heat transfer factor) ของเปลือกและท่อจากรูปที่ ค.6 และ ค.7 ตามลำดับ ได้ค่า Heat transfer factor ของเปลือก เท่ากับ 3.5×10^{-4} และ ค่า Heat transfer factor ของท่อ เท่ากับ 3.6×10^{-3} คำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเปลือกและท่อจากสมการที่ ค.7 และ ค.8 ได้ $1,400 \text{ W/m}^2\text{°C}$ และ $1,540 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ตามลำดับ



รูปที่ ค.6 แพกเตอร์การถ่ายเทความร้อนในเปลือก (Towler, G. and Sinnott, R. 2012)



รูปที่ ค.7 แพกเตอร์การถ่ายเทความร้อนในท่อ (Towler, G. and Sinnott, R. 2012)

ค.2.9 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($U_{o, cal}$)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมคำนวณได้จากสมการที่ ค.9

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{od}} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2k_w} + \left(\frac{d_o}{d_i} \times \frac{1}{h_{id}}\right) + \left(\frac{d_o}{d_i} \times \frac{1}{h_i}\right) \quad (\text{ก.9})$$

หาค่า $\frac{1}{h_{od}}$ และ $\frac{1}{h_{id}}$ จากตารางที่ ค.6 ได้ 0.000714 m²°C/W และ 0.000352 m²°C/W ตามลำดับ

ตารางที่ ค.6 ค่าความต้านทานที่เกิดจากความสกปรกสำหรับโรงกลั่นน้ำมัน (Kakak, S et.al. 2012)

Streams	R_f (m ² · K/W)
Gasoline	0.000352
Naphtha and light distillates	0.000352–0.000528
Kerosene	0.000352–0.000528
Light gas oil	0.000352–0.000528
Heavy gas oil	0.000528–0.000881
Heavy fuel oils	0.000881–0.001233

Streams	R_f (m ² · K/W)
<i>Catalytic reforming, hydrocracking, and hydrodesulfurization</i>	
Reformer charge	0.000264
Reformer effluent	0.000264
Hydrocracker charge and effluent ^a	0.000352
Recycle gas	0.000176
Hydrodesulphurization charge and effluent ^a	0.000352
Overhead vapors	0.000176
Liquid product over 50° A.P.I.	0.000176
Liquid product 30–50° A.P.I.	0.000352

จากสมการที่ ค.9 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{1,400} + 0.000352 + \frac{0.019 \ln\left(\frac{0.019}{0.0148}\right)}{51} + \left(\frac{0.019}{0.0148} \times 0.000714\right) + \left(\frac{0.019}{0.0148} \times \frac{1}{1,540}\right)$$

$$U_o = 352.1 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

เปรียบเทียบ $U_{o,cal}$ ที่คำนวณได้กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สมมติในข้อที่ ค.2.4 หากมีค่าต่างกันให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้เป็นค่าสมมติและทำการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใหม่ตั้งแต่ข้อที่ ค.2.4

ตารางที่ ค.7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สมมติกับค่าที่คำนวณได้

$U_{o, \text{ass}} \text{ (W/m}^2\text{°C)}$	$U_{o, \text{cal}} \text{ (W/m}^2\text{°C)}$
350	352.1
352.1	352.17
352.7	352.7

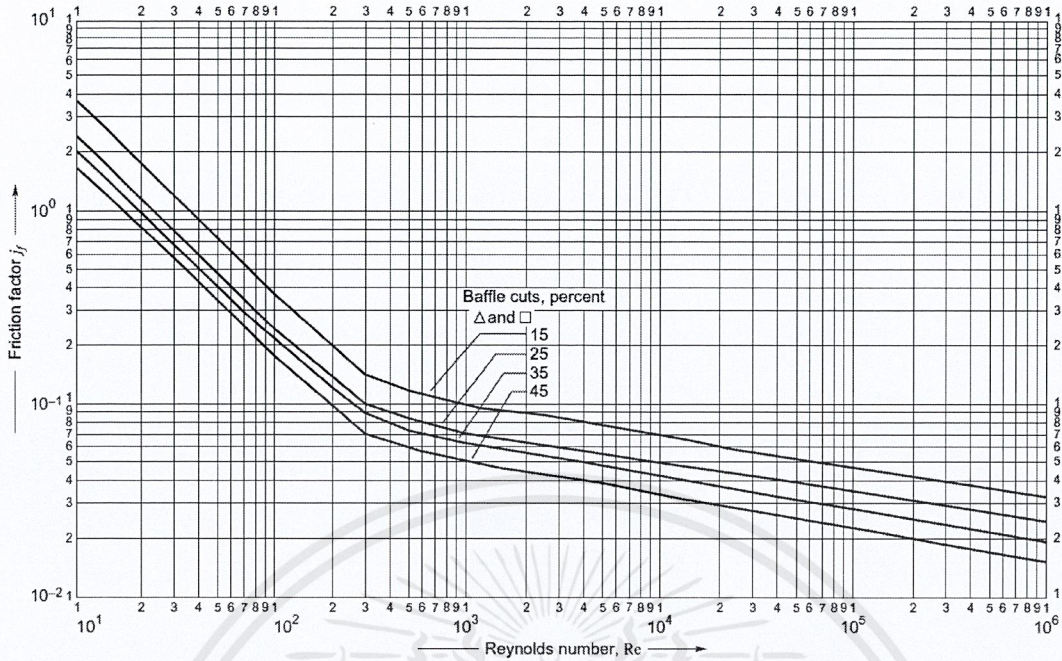
ค.2.10 คำนวณความดันลดในเปลือกและท่อ

ความดันลดในเปลือกและท่อคำนวณได้จากสมการที่ ค.10 และ ค.11 ตามลำดับ

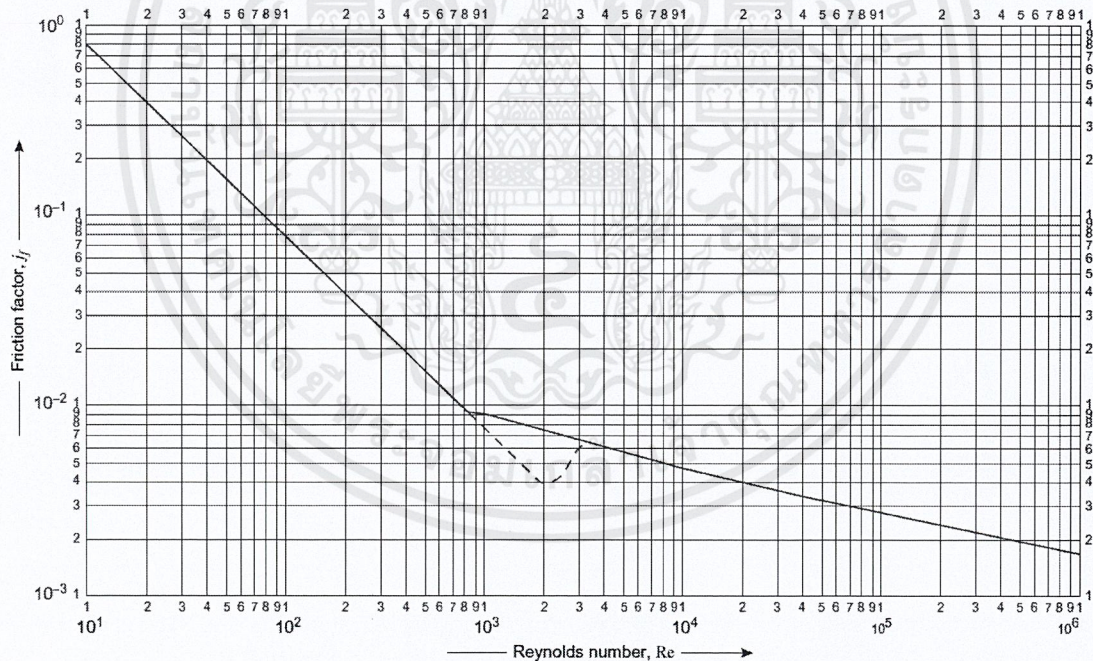
$$\Delta P = 8j_f \left(\frac{D_s}{d_c} \right) \left(\frac{L}{l_B} \right) \left(\frac{\rho u_s^2}{2} \right) \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-0.14} \quad (\text{ค.10})$$

$$\Delta P = N_p \left[8j_f \left(\frac{L}{d_i} \right) \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-0.14} + 2.5 \right] \left(\frac{\rho u_i^2}{2} \right) \quad (\text{ค.11})$$

หาค่า j_f (Friction factor) ของเปลือกและท่อจากรูปที่ ค.8 และ ค.9 ตามลำดับ ได้ค่า Friction factor ในเปลือก เท่ากับ 4.9×10^{-3} และ ค่า Friction factor ในท่อ เท่ากับ 3.5×10^{-3} คำนวณความดันลดในเปลือกและท่อจากสมการที่ ค.10 และ ค.11 ได้ 20,700 Pa และ 17,700 Pa ตามลำดับ



รูปที่ ค.8 แฟกเตอร์ความเสียดทานในเปลือก (Towler, G. and Sinnott, R. 2012)



รูปที่ ค.9 แฟกเตอร์ความเสียดทานในท่อ (Towler, G. and Sinnott, R. 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.11 สรุปผลการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การออกแบบฝั่งเปลือก:

ชนิดของของไหล: น้ำมันจากการแตกตัวด้วยแก๊สไฮโดรเจน

จำนวน Shell pass: 1

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน: 23.25 in (591 mm.)

วัสดุ: เหล็กกล้าคาร์บอน

ระยะห่างแผ่นกั้น: 550 mm.

ขนาดตัดของแผ่นกั้น: 20%

การออกแบบฝั่งท่อ:

ชนิดของของไหล: UCO

จำนวนท่อทั้งหมด: 280

จำนวน Tube passes: 8

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก: 19 mm.

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน: 14.83 mm.

ความหนาของท่อ: 2.108 mm.

วัสดุ: เหล็กกล้าคาร์บอน

ระยะห่างระหว่างท่อ: 23.81 mm.

ค.2.12 ราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 500 USD/m² (อ้างอิงราคาจาก BCP) จำนวน 2 เครื่อง มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 59.87 m²/เครื่อง ดังนั้นราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 1.76 MTHB โดยไม่ได้พิจารณาติดตั้ง ระบบท่อ ระบบควบคุม เครื่องมือวัด และค่าแรง

ค.2.13 ปริมาณค่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ลดลง

คิดราคาแก๊สเชื้อเพลิง 291 THB/MMBTU (อ้างอิงราคาจาก BCP) โดยคิดประสิทธิภาพของเตาให้ความร้อนที่ 80% พลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ 961,450 W ลดการใช้แก๊สเชื้อเพลิงได้ 9.74 MTHB/yr

ตารางที่ ค.8 สรุปผลการคำนวณของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวแปร		70% Conv.	80% Conv.	90% Conv.
อัตราการไหล (kg/s)	ฝั่งเปลือก	37.9	37.9	37.9
	ฝั่งท่อ	4.95	6.54	3.37
อุณหภูมิขาเข้า (°C)	ฝั่งเปลือก	240		
	ฝั่งท่อ	350		
อุณหภูมิขาออก (°C)	ฝั่งเปลือก	262.02	253.55	249
	ฝั่งท่อ	278.76	279.5	259
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m ² °C)	ฝั่งเปลือก	1,400	1,400	1,400
	ฝั่งท่อ	1,590	2,560	2,070
ความดันลด (Pa)	ฝั่งเปลือก	20,700	20,700	20,700
	ฝั่งท่อ	17,700	59,700	36,700
ความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ (MW)		2.34	1.15	0.96
ราคาอุปกรณ์ (MTHB)		1.76		
ค่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ลดลง (MTHB/yr)		23.73	14.62	9.74

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวณัฐชา นัยนันท์
วัน เดือน ปีเกิด	5 ธันวาคม 2540 จังหวัดราชบุรี
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 50/1 หมู่ 6 ถนนแสงชูโต ตำบลดอนขมิ้น อำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี รหัสไปรษณีย์ 71120
E-mail	nutcha.naiyanan@gmail.com
โทรศัพท์	086-339-4416
ประวัติการศึกษา	2556-2558 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 2559-ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	5 ม.ค. – 8 ม.ค. 2562 รองประธานค่ายแนะแนววิชาชีพวิศวกรรมเคมีครั้งที่ 8 (CEL Camp 8) 4 มิ.ย. – 28 ก.ค. 2562 นักศึกษาฝึกงานภาคฤดูร้อน ส่วนวิศวกรรมกระบวนการผลิต โรงแยกก๊าซธรรมชาติระยอง บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) 5 ส.ค. – 30 พ.ย. 2562 สหกิจศึกษา ส่วนเทคนิคโรงกลั่น บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)
ทุนการศึกษา	มี.ค. 2561 ทุนการศึกษาประเภทเรียนดี ประจำปีการศึกษา 2560 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มี.ค. 2562 ทุนการศึกษาประเภทเรียนดี ประจำปีการศึกษา 2561 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้